

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra obrábění a montáže



**Souvislosti mezi akustickými emisemi a faktory  
hydroabrazivního dělení**

**Conections between Acoustic Emissions and the Factors  
Hydroabrassive Cutting**

**Student:**

Bc. Jan Tošenovský

**Vedoucí diplomové práce:**

doc. Ing. Robert Čep, Ph.D.

**Ostrava 2013**

## Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Jan Tošenovský**  
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství  
Studijní obor: 2303T002 Strojírenská technologie  
Téma: Souvislosti mezi akustickými emisemi a faktory hydroabrazivního dělení  
Connections between Acoustic Emissions and the Factors Hydroabrassive Cutting

Zásady pro vypracování:

1. Analýza současného stavu řešené problematiky.
2. Definování nedostatků a návrh řešení problému.
3. Experimentální metodika a experimentální ověření.
4. Výsledky a diskuze.
5. Nový přístup k řešeným problémům.
6. Závěr.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] HLOCH, Sergej; VALÍČEK, Jan. *Vplyv faktorov na topografiu povrchov vytvorených hydroabrazívnym delením*, 1. vyd, Prešov : FVT TUKE, 2008, 125 s. ISBN 978-80-553-0091-7.
- [2] HLOCH, Sergej; VALÍČEK, Jan. *Teoetické spracovanie a základný projekt prevádzkovej aplikácie automatizovaného riadenia technológie hydroabrazívneho delenia technických materiálov*, 1. vyd., Prešov : FVT TUKE, 2008, 77 s. ISBN 978-80-553-0133-4.
- [3] HLOCH, Sergej; VALÍČEK, Jan. *Riadenie kvality povrchov vytvorených hydroabrazívnym delením pomocou vibrácií a hluku*, 1. vyd., Prešov : FVT TUKE, 2009, 99 s. ISBN 978-80-553-0316-1.
- [4] HLOCH, Sergej et al. *On-line identifikácia hydroabrazívneho delenia pomocou akustickej emisie a vibrácií*, 1. vyd., Prešov : FVT TUKE, 2011, 124 s. ISBN 978-80-553-0698-8.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Robert Čep, Ph.D.**

Konzultant diplomové práce: doc. Ing. Sergej Hloch, PhD.

Datum zadání: 14.12.2012

Datum odevzdání: 20.05.2013



Ing. et Ing. Mgr. Jana Petřů, Ph.D.  
vedoucí katedry

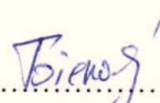


doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.  
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě ..... 20.5.2013 .....

.....  .....  
podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- Beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- Souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- Bylo sjednáno, že užít s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- Bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohou jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- Beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě : 20.5.2013 .....

.....  
Tošenovský  
podpis

Jméno a příjmení autora práce: Bc. Jan Tošenovský

Adresa trvalého pobytu autora práce: Brantice, Radim 116

## ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

TOŠENOVSKÝ, J. *Souvislosti mezi akustickými emisemi a faktory hydroabrazivního dělení: Diplomová práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění a montáže, 2013, 100 s. Vedoucí práce: Doc. Ing. Robert Čep, Ph.D.

Tato diplomová práce hledá souvislosti mezi akustickou emisí a faktory hydroabrazivního dělení. V úvodní části je se věnuje analýze současného stavu výzkumu popisuje základní principy této technologie. Dále jsou popsány předchozí práce, kde byly sledované projevy akustické emise při nastavení předem plánovaných řezných podmínek. Ve výzkumné části je nejdříve popsán projev akustické emise v čase. Druhá část obsahuje analýzu FFT spekter akustické emise pro jednotlivé úseky řezu. Třetí část srovnává hodnoty Peak to Peak v závislosti na testovaných řezných podmínkách.

## ANOTATION OF MASTER THESIS

TOŠENOVSKÝ, J. *Connections between Acoustic Emission And the Factors Hydroabrassive Cutting. Master Thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Maching and Assembly, 2013, 100 p. Thessis head: Doc. Ing: Robert Čep, Ph.D.

The main aim of this master thesis is to find out the contexts between acoustic emission and factors of hydroabrasive cutting. In its introduction it is focused on analysis of current level of research and base principles of this technology are described. Further there are depicted previous works where observed display of acoustic emissions during advance planned cutting conditions. In its research chapter acoustic emission display in time is described firstly. The next chapter sums up analysis of acoustic emission FFT spectral for single compartment of cutting. Thesis also includes quates Peak to Peak measurement depending on tested cutting conditions.

## Obsah

Seznam použitých symbolů .....	2
1. Úvod .....	3
2. Zhodnocení současného stavu .....	4
2.1. Charakteristika nástroje.....	5
2.2. Kontinuální vodní proud .....	6
2.3. Kavitační vodní proud.....	7
2.4. Abrazivní vodní proud AWJ .....	7
2.5. Vytváření nástroje .....	8
2.6. Konstrukce zařízení AWJ .....	8
2.7. Faktory AWJ .....	9
2.7.1. Hydrodinamické faktory .....	10
2.7.2. Smíchávací faktory .....	11
2.7.3. Abrazivní faktory .....	11
2.7.4. Technologické faktory .....	12
3. Definování cílů .....	13
4. Experimentální část .....	14
5. Výsledky experimentu .....	20
5.1. Průběhy signálů akustické emise v čase.....	21
5.1.1. Průběhy signálů akustické emise v čase sady vzorků A .....	21
5.1.2. Průběhy signálů akustické emise v čase sady vzorků B .....	23
5.1.3. Průběhy signálů akustické emise v čase sady vzorků C .....	26
5.1.4. Průběhy signálů akustické emise v čase sady vzorků D .....	28
5.2. Frekvenční analýza.....	30
5.2.1. Analýza FFT spekter sady vzorků A .....	31
5.2.2. Analýza FFT spekter sady vzorků B.....	45
5.2.3. Analýza FFT spekter sady vzorků C.....	59
5.2.4. Analýza FFT spekter sady vzorků D .....	73
5.3. Analýza hodnot Peak to Peak v závislosti na řezných parametrech .....	87
6. Závěr.....	91
Seznam použité literatury .....	93

## **Seznam použitých symbolů**

$d_f$	Průměr zaostřování [mm]
$d_p$	Průměr částice [mm]
$d_0$	Průměr dýzy [mm]
$H_p$	Tvrdost abraziva
$l_F$	Délka zaostřovací trubice [mm]
$m_a$	Hmotnostní tok [ $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$ ]
$n_p$	Počet přechodů [-]
$p$	Tlak čepadla [MPa]
$s_a$	Směr přívodu abraziva [ $^\circ$ ]
$s_p$	Směr posuvu [ $^\circ$ ]
$v$	Rychlost posuvu [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ]
$z$	Zdvih [mm]
$\varphi$	Úhle působení [ $^\circ$ ]

## **1. Úvod**

V posledních letech se neustále zvyšují požadavky na kvalitu, kvantitu a také na ekologickou a ekonomickou část výroby. Vyvíjejí se neustále nové, odolnější a tvrdší materiály. U těchto odolných materiálů už nemusí být konvenční metody obrábění výhodné, nebo dokonce selhávají úplně. Z těchto důvodů se do popředí dostávají nekonvenční metody obrábění jako je například hydroabrazivní vodní proud (Abrasive WaterJet - AWJ).

Využívá se zde vysoká rychlost vodního proudu s malými částicemi abrazivních částic. To umožňuje obrábět materiály různých vlastností např. papír, dřevo, plasty, kámen, kompozity i tvrdokovy. Hlavní výhodou je zde univerzálnost nástroje, ekologičnost technologie a nehrozí zde tepelné ovlivnění obráběného materiálu. V posledních letech se zde otevírá možnost on-line řízení řezného procesu pomocí akustické emise. Na akustickou emisi se pohlíží jako na nositele informací o kvalitě řezu.

Tato diplomová práce hledá závislosti mezi akustickou emisí a faktory technologie AWJ. Zkoumané řezné faktory jsou v tomto případě hmotnostní tok  $m_a$ , posuvová rychlost řezné hlavy  $v$  a průměr zaostřovací trubice  $d_f$ . Tato práce vyhodnocuje časové průběhy akustické emise, signály FFT spekter a pomocí marginálních grafů srovnává průběhy hodnot Peak to Peak akustické emise v závislosti na zkoumaných řezných faktorech.



## 2. Zhodnocení současného stavu

V dnešní době se neustále zvyšují požadavky na kvalitu a množství výrobků. Pro výrobu kvalitních výrobků jsou potřeba kvalitní materiály, které mají výborné vlastnosti pro účel výrobku. V tomto důsledku se neustále vyvíjejí nové a nové materiály s lepšími fyzikálními a chemickými vlastnostmi. Dnes existuje přes 50 000 známých materiálů [19]. Stejně jak se zvyšují nároky na materiály, zvyšují se nároky na vývoj nekonvenčních technologií. Jedním z nekonvenčních způsobů je dělení materiálu vodním proudem. Tento nástroj je jeden z mála, který je schopný přizpůsobit se novým, těžko obrobitelným, materiálům [4],[13],[20],[23].

Vodním proudem je možné obrábět materiály různých fyzikálních vlastností a rozměrů. Do proudu vody je možné přidávat drobné abrazivní částice. Vzniká pak hydroabrazivní proud neboli Abrasive WaterJet označovaný zkratkou AWJ. Použité částice v proudu vody jsou nejčastěji granát Barton, australský granát nebo norský olivín [20].

Vědci se začali touto technologií zabývat už do prvního použití AWJ v průmyslu v šedesátých letech. Začali se zajímat o tuto technologii jako o celek. Nejdříve byly matematicky a fyzikálně popsány děje při vstupu do obráběného materiálu. Fyzikálním popisem mechanismů úběru materiálu na obrobené ploše se zabývali práce [1] a [2]. Zde autoři začínali popisovat kvalitu obrobených ploch.

První pokusy o nastavení optimálních řezných faktorů (zdvih řezné hlavy, rychlost posuvu, tlak) jsou popsány v publikacích [7], [8], [21].

Použití vodního paprsku má také nedostatky. Jeden z hlavních nedostatků je kvalita obrobeného povrchu. Vodní proud nedosahuje kvality povrchu, kterou známe u konvenčních ověřených metod. Vědci se tedy snažili dosáhnout zlepšení kvality povrchu nastavením vstupních parametrů řezu [5], [22]. Ani dnes neexistuje univerzální nastavení vstupních parametrů. Optimální kombinace se liší v závislosti na druhu materiálu nebo jeho tloušťce. Na základě dříve známých příčin byly v pracích [13], [16], [17], [28], [30], popsány dosud nesledované možné příčiny nerovnosti a vlnitosti obrobené plochy [4].

V posledních letech se v oblasti technologie AWJ zkoumá možnost on-line monitorování a řízení řezného procesu. Touto problematikou se zabývají zprávy [3], [9], kde je popsán vývoj a využívání energeticko-monitorovacích metod, kterými se sleduje

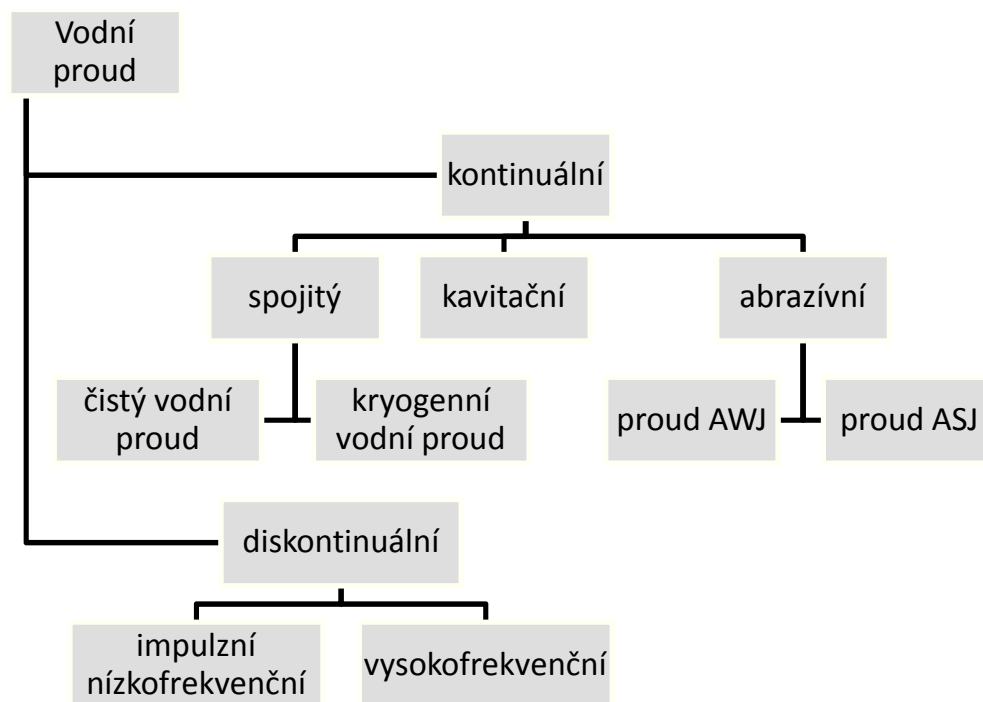
akustická emise u AWJ. Akustickou emisi považují za škodlivou autoři [10],[12] a snaží se redukovat hluk při obrábění hydroabrazivním proudem. V publikacích [18], [24], [25], [26] použili akustickou emisi jako nástroj pro monitorování procesu řezání. On-line řízení řezného procesu má výhody. Je tu možnost sledovat stav procesu na výstupu z trysky a v určité hloubce řezu pomocí snímačů, pomocí aktuálních hodnot akustické emise. Byla by možná on-line korekce některých řezných faktorů pokud by v řezu byla zjištěna chyba.

U AWJ existuje mnoho vstupních technologických faktorů. Proto taky existuje obrovské množství měřitelných a neměřitelných závislostí akustické emise na faktorech procesu AWJ [4].

Tato práce změřit a vyhodnotit charakter akustické emise při změně řezných podmínek. Výsledek této práce bude užitečný u AE on-line systémů řízení hydroabrazivního proudu.

## 2.1. Charakteristika nástroje

Pro charakteristiku hlavních metod čistým vysokorychlostním proudem je potřebné specifikovat hlavní druhy používaných vodních proudů [1].



Obr. 2.1 Rozdělení kapalinových proudů

Spojitý vodní proud dělíme na čistý vodní proud (VP) a kryogenní proud. Stejně tak i abrazivní vodní proud se dá dělit na hydroabrazivní proud (AWJ) a proud abrazivní suspenze (Sbrasive Suspension Jet - ASJ) [14].

Teoretické rozpracování nebo laboratorní zkoušení probíhá u všech uvedených způsobů. Hlavně však u diskontinuálního vodního proudu, u proudu suspenze ASJ, kryogenního proudu a kavitačního. V současné praxi se v největší míře používají dvě nejrozšířenější metody dělení proudem vody: čistý vysokorychlostní proud (VP) a hydroabrazivní proud (AWJ) [11], [14], [29].

## 2.2. Kontinuální vodní proud

**Čistý proud vody** – Systém naplno využívá vlastnosti vody při vysokorychlostních tlacích. Používá se obyčejná voda, případně prochází vhodnou úpravou (např. filtrace, odstranění nerozpustných minerálů), aby se zabránilo zbytečnému opotřebování dýzy nebo zanášení systému nečistotami [14].

Proud vody může být generován dvěma způsoby:

- 1.) Pístovým hydrogenerátorem – konstrukční návrh hydrogenerátoru je omezen vysokými tlaky. Jsou schopné generovat tlaky maximálně do 275 MPa při výkonu 750 kW a vysokých průtocích až 400 l/min. Není zapotřebí akumulátor [14].
- 2.) Multiplikátorem – Využívají se na změnu tlakových parametrů rozdíly pracovních ploch vysokotlakého a nízkotlakého pístu. Množství kapaliny, které dodává multiplikátor, není kontinuální ale pulzující. Proto se pro vyrovnání polzujícího tlaku využívá akumulátor. Tyto systémy běžně generují tlaky až 650 MPa při výkonu 85 kW a průtoku 1 l/min [14].

Pro objasnění základních mechanismů dělení musíme poznat základní strukturu proudu, rozdělení dynamického tlaku na vzorku materiálu a vstupní technologické parametry. Při tomto způsobu dělení nejdůležitější parametr vzdálenost kdy se proud ještě nerozpadá na kapky (je soudržný). To závisí na správném nastavení technologických parametrů i na vhodném tvaru dýzy, aby bylo zajištěné přesné dělení materiálu [14].

Čistým vodním proudem se dělí hlavně materiály s nižší pevností například papír, plasty, guma, textil, dřevo, mražené výrobky, potraviny atd. [14].

**Kryogenní proud vody** – pracuje při nízkých teplotách ( $-100^{\circ}\text{C}$  a méně). Je známo více možných aplikací, kde vodní proud svými vlastnostmi nevyhovuje, nepostačuje, nebo prostě není nejvhodnějším typem nástroje. Proto se vyvíjejí systémy pracující s kryogenním vodním proudem [14].

Při přidávání krystalků ledu ve tvaru kuliček do proudu vody se efektivnost dělení výrazně zvýší [27]. Tyto ledové krystalky mohou být z vody nebo ze stlačeného pevného  $\text{CO}_2$ . Tvorba ledu z  $\text{CO}_2$  je méně vhodnější jak tvorba ledu z vody [27].

### 2.3. Kavitační vodní proud

Zde je využíván jev, kde porušení materiálu vyvolává destrukční síla kavitačních bublinek. Kavitační proud vody je spojitý proud vody obsahující kavitační bubliny. Jsou vytvořené lokálními vysokými rázy tlaku. Kavitační vodní proudy se generují při nízkých tlacích (do 100 MPa) a používají se tam, kde není vyžadována přesnost. Bublínky totiž nejsou do proudu dodávány pravidelně [14].

### 2.4. Abrazivní vodní proud AWJ

Primícháním abrazivních částic do vysokotlakého proudu vody se výrazně zvýší výkony dělení. Princip AWJ je následující. Do proudu vody se přidávají abrazivní částice, kterým voda předá část své hybnosti. Hydroabrazivním proudem se nazývá kontinuální proud vody, ve kterém se nacházejí tuhé částice abraziva malých rozměrů [14].

Abrazivní proud je vytvářen dvěma základními způsoby:

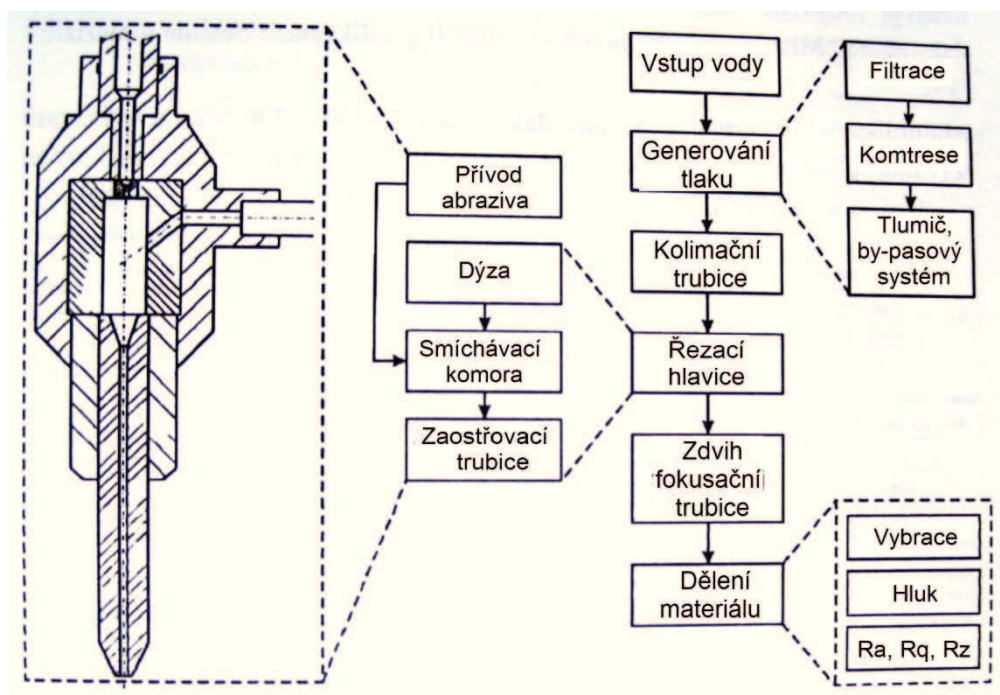
- 1.) Hydroabrazivní proud (AWJ), kde abrazivní částice jsou ze zásobníku vedené do smíchávací komory, a následně jsou strhnuty vysokou rychlostí proudem vody. Směs je pak zrychlována přes vodní dýzu a zaostřovací trubici.
- 2.) Proud abrazivní suspenze, ve kterém jsou abrazivní částice smísené s vysokotlakou vodou v tlakové nádobě a stlačená suspenze je přiváděná do vodní dýzy která má speciální konstrukci [14]

Primíchávání abrazivních částic se děje v důsledku vzniku podtlaku při protékání vody přes vodní dýzu. Tomuto jevu říkáme venturiho efekt. Po přechodu proudu dýzou se

proud rozšiřuje, čímž se mění laminární proudění na proudění turbulentní a vzniká podtlak a přimíchávání abrazivní směsi do proudu vody. Vzhledem k vysoké kompaktnosti proudu se částice abraziva jen nalepí na povrch vodního sloupce a vytvoří tak jakýsi obal. Tato nedokonalost smíchávání vody s abrazivem snižuje řeznou účinnost[14]. Předmětem zkoumání jsou proto i různé tvary dýz, které by tuto nedokonalost zmírnily.

## 2.5. Vytváření nástroje

Principem obrábění vodním paprskem je generování vysokého tlaku vody. Ta při průtoku tryskou, která má malý průměr, získá velmi vysokou kinetickou energii. Tak vzniká flexibilní nástroj, kterým je možné obrábět všechny technické materiály. Viz obrázek Obr.1.2.



Obr. 2.2 Schéma vzniku, formování a působení AWJ na obráběný materiál [14]

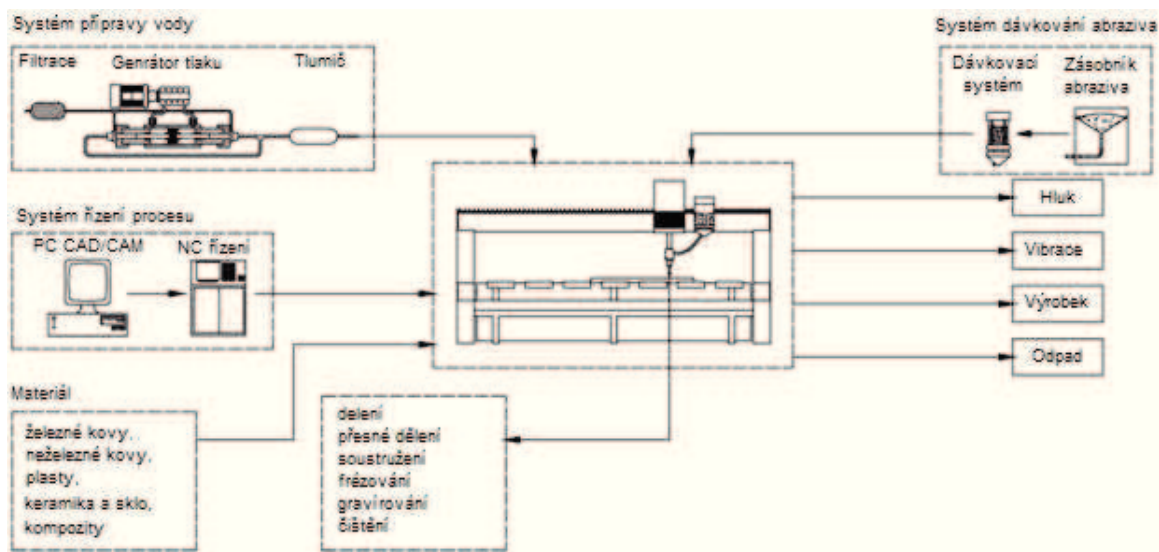
## 2.6. Konstrukce zařízení AWJ

Konstrukce AWJ se skládá ze čtyř hlavních částí

1. Hydraulické čerpadlo se zesilovačem
2. Zásobovací systém abraziva – dodává abrazivo do řezací hlavičky
3. Počítačem řízený manipulátor – vykonává požadovaný pohyb řezné hlavičky
4. Vana – zachytává zbytkovou kinetickou energii hydroabrazivního proudu po dělení materiálu

Systém musí plynule generovat tlak s konstantními efektivními hodnotami. To zajišťují dva druhy zařízení generující vysokotlaký proud

1. Plunžrové čerpadla – dříve se používala jen u plošně působícího nástroje ale dnes jsou už schopné generovat tlaky až 350MPa, což umožňuje využití i při dělení materiálu. [19]
2. Multiplikátorové čerpadla – tlak kapaliny 300 – 700 MPa. Využívají násobič tlaku (multiplikátor). Zesílení tlaku je dané přímo velikostí ploch pístu násobiče, které se pohybují v rozmezí mezi 1:10 a 1:25. [16]



Obr.2.3 Schéma konstrukce technologie vysokorychlostního hydroabrazivního proudu [15]

## 2.7. Faktory AWJ

Tab 2.1 Přímé a nepřímé faktory AWJ [19]

	Faktory	Druh	Označení	Jednotky
Hydrodinamické	Hydraulické	Tlak čepadla	$p$	[MPa]
		Průměr dýzy	$d_0$	[mm]
	Smíchávací	Průměr zaostřování	$d_f$	[mm]
		Směr přívodu abraziva	$s_a$	[°]
		Délka zaostřovací trubice	$l_F$	[mm]
	Abrazivní	Hmotnostní tok	$m_a$	[kg·s <sup>-1</sup> ]
		Vlhkost abraziva		
		Průměr částice	$d_p$	[mm]
Tvar abraziva				
Tvrdost abraziva		$H_p$		
Primární	Technologické	Rychlost posuvu	$V$	[m·s <sup>-1</sup> ]
		Počet přechodů	$n_p$	[-]
		Směr posuvu	$s_p$	[°]
		Zdvih	$z$	[mm]
		Úhle působení	$\varphi$	[°]

### 2.7.1. Hydrodinamické faktory

Určení vhodných hydrodinamických parametrů je složité. Je zde prostor pro práce, které přiblíží ideální nastavení tlaku, hmotnostního toku, atd. vzhledem k určitému materiálu.

#### Tlak

Tlak je jeden z nejdůležitějších faktorů které ovlivňují vznik nástroje a ovlivňuje zejména hloubku řezu a rychlost posuvu řezné hlavičky. Voda o vysokém tlaku se smíchá s abrazivními částicemi ve smíchávací komoře, dostává kinetickou energii a vytváří pracovní nástroj [14]. Se zvyšujícím se tlakem vody můžeme dosáhnout vyšších hloubek řezu, nebo vyšších posuvových rychlostí při stejném nastavení ostatních parametrů. Hodnota tlaku se pochopitelně mění i v závislosti na děleném materiálu.

#### Průměr vodní dýzy

Další velmi důležitý faktor ovlivňující kinetickou energii a vznik řezného nástroje. Po průchodu vysokotlaké vody přes vodní dýzu se ve smíchávací komoře voda smísí s abrazivními částicemi a vzniká vysokotlaký proud, který směřuje do zaostřovací trubice. Průměr zaostřovací trubice je závislý na průměru dýzy. Jsou zde předepsané poměry pro požadované rychlosti vodního proudu. [14]

### **2.7.2. Smíchávací faktory**

#### Rozměry zaostřovací trubice

Zaostřovací trubice má za úkol usměrnit vodní proud a hlavně zajistit, aby všechny abrazivní částice byly dopraveny směrem k obráběnému materiálu. Při smíchávání abraziva s vodou mají částice nepatrnou rychlost a v zaostřovací trubici jsou vodou zrychlovány. Zrychlující se částice jsou vytlačovány z proudu vody a zasahují stěnu trubice a jsou nasměrovány zpět do proudu. Vlivem tření abrazivních částic o stěny zaostřovací trubice dochází k velkým ztrátám. Úbytek energie je v závislosti na délce trubice okolo 65%. [14]

### **2.7.3. Abrazivní faktory**

Abrazivní částice jsou hlavní řeznou složkou vzniklé suspenze (řezného nástroje). Je zapotřebí abrazivo s vysokou tvrdostí, odolností proti otěru a chemickou stálostí. Pro řezy větších hloubek je dobré použít abrazivní částice s ostrými hranami, protože způsobují větší deformační opotřebení a pro hluboký řez jsou efektivnější. Nejčastěji se při technologii AWJ používají:

- 3.) australský olivín
- 4.) norský olivín
- 5.) granát Barton [13]

#### Hmotnostní tok abraziva



Hmotnostní tok je také důležitým parametrem hydroabrazivního vodního proudu. Se zvyšujícím se abrazivním tokem dosáhneme většího počtu nárazů částic na obráběný materiál. S vyšším hmotnostním tokem však roste i počet kolizí v proudu a zaostřovací trubici. Klesá výsledná rychlost (kinetická energie) řezného nástroje a to omezuje výslednou řeznou hloubku. [14]

#### **2.7.4. Technologické faktory**

##### Rychlost posuvu

Menší řezné rychlosti umožňují aby hydroabrazivní proud déle působil na obráběný materiál. Větší počet částic působí v řezu a mohou být řezány větší hloubky materiálů. Patří mezi přímé faktory procesu[14].

##### Zdvih

Zdvih je vzdálenost mezi materiálem a ústí zaostřovací trubice, kde proud není v kontaktu s materiálem. Zatím není přesně znám význam výšky zdvihu při hodnocení faktorů a jeho vliv na kvalitu obrobené plochy. [14]

##### Úhel sklonu

Nastavení úhlu sklonu má nepochybně vliv na kvalitu řezu. Z práce [6] je zřejmé, že změna úhlu z 90° na 80-60° umožňuje minimalizovat zastavování proudu ve spodní části řezu a mohou být dělené větší hloubky materiálu při stejném nastavení řezných faktorů. [14]

##### Počet přechodů

Více přechody je při stejném tlaku řezat to větších hloubek. Při každém dalším přechodu hloubka řezu nižší, protože proud AWJ musí odolávat odporu a tření o stěny materiálu v řezu. Stěny také zhoršují odvod již použité kapaliny z místa řezu. [14]

### 3. Definování cílů

Předchozí práce se zaměřovaly především na optimální nastavení vstupních řezných parametrů v závislosti na hloubku řezu, šířce řezu a kvalitě obrobené plochy (drsnost, vlnitost).

V předchozí kapitole bylo zmíněno, že nejprve byla akustická emise považována za škodlivý faktor řezného procesu, a vznikaly práce, které byly zaměřené na snížení akustické emise (hluku). Dnes je akustická emise považována za potencionální nosič informací o kvalitě řezu. Aby mohla být akustické emise použita pro on-line řízení technologie AWJ, dostatečně popsána závislost mezi faktory AWJ a akustickou emisí.

Tato práce se bude zabývat akustickou emisí a její závislosti na těchto parametrech:

- Průměr zaostřovací trubice  $d_f$
- Hmotnostní tok abrazivních částic  $m_a$
- Rychlost posuvu  $v$

Cílem práce je vyjádřit závislosti mezi signály akustické emise a faktory hydroabrazivního dělení na základě:

- časových rozborů amplitud akustické emise
- analýzy dat FFT spekter signálů akustické emise pro jednotlivé úseky vzorků
- analýza hodnot Peak to Peak pro úseky experimentálních vzorků.
- analýza hodnot Peak to Peak v závislosti na řezných parametrech

Výsledky práce budou přínosem pro řešení těchto nedostatků:

- nedostatečné skloubení signálů akustické emise a on-line řízení technologie AWJ
- nedostatečně charakterizované vztahy mezi vstupními faktory AWJ a akustické emise nebo vibracemi
- nedostatečně definovaná stabilita řezu na základě nastavení vstupních faktorů a pro různé materiály

## 4. Experimentální část

Tato práce vznikla v rámci projektu VEGA 1/4157/7 ve spolupráci s Fakultou výrobních technologií Technické univerzity v Košicích se sídlem v Prešově.

Tab. 4.1 Technologické parametry experimentu

Faktory	Experimentální rozsah
Tlak $p$ [MPa]	350
Rychlost posuvu $v$ [mm·min <sup>-1</sup> ]	50, 75, 100, 150
Hmotnostní tok abraziva $m_a$ [g·min <sup>-1</sup> ]	400, 250
Průměr vodní dýzy $d_0$ [mm]	0,14
Průměr zaostřovací trubice $d_f$ [mm]	0,8; 1,4
Zdvih $z$ [mm]	3
Počet přechodů	1
Úhel sklonu řezné hlavy $\varphi$ [°]	90
Druh abraziva	Barton Gamet
MESH	80
Charakteristika násobiče Stream Line Pump SL III	
Typ násobiče	Dvojčinný
Výkon	50 HP
Tlak oleje	20MPa
Maximální tlak	380MPa
Zesilovací poměr	20:1
Objem tlumiče	2 l
Typ řezné hlavy	Ingresoll Rand - Autoline <sup>TM</sup>

Experiment byl prováděn na materiálu AISI 309. Je to austenitická žáruvzdorná austenitická ocel. Je vhodný na výrobu tepelně a mechanicky namáhaných součástí. Byl použit plech o tloušťce 15mm.

Chemické složení: C 0,20%, Mn 2%, Si 1%, Cr 22-24%, Ni 12-15%, P 0,045%, S 0,03%

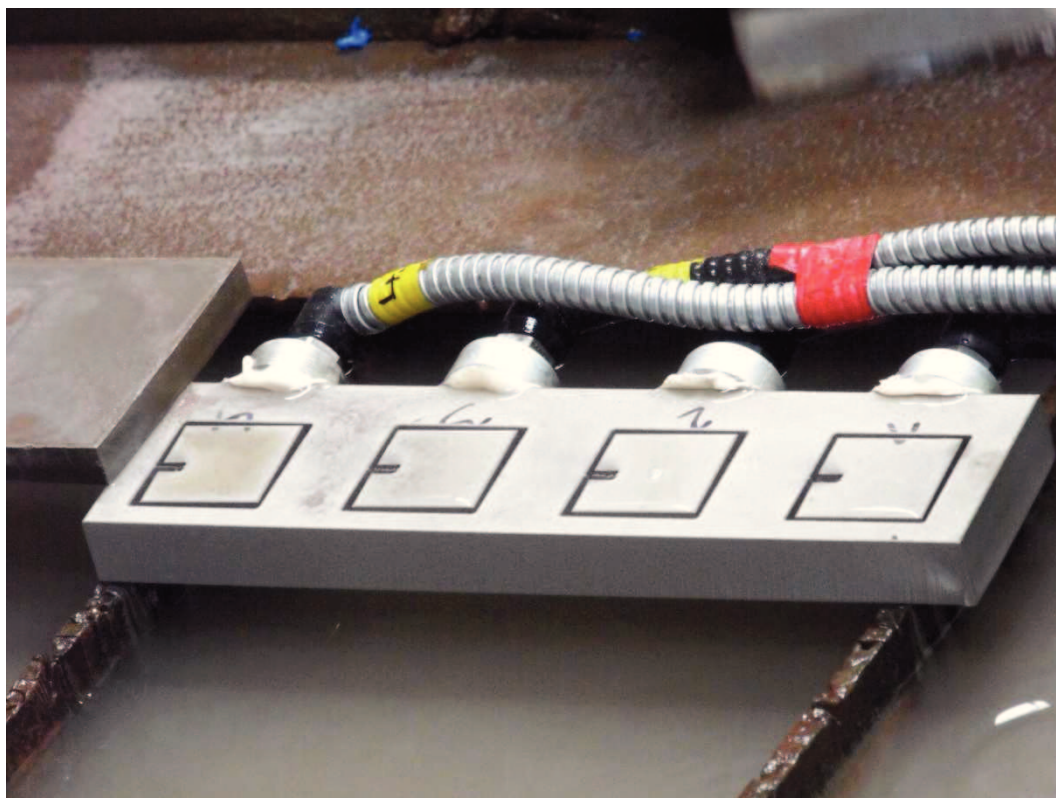
Mechanické vlastnosti: HRB 95,  $\mu=0,27-0,3$ ,  $E = 200$  GPa,  $\sigma_t = 515$  MPa,  $\sigma_K = 205$  MPa,  $A = 40\%$ ,  $Z = 50\%$

Schéma řezání experimentálních vzorků je na obrázku Obr 2.1. Některé předchozí práce se zabývali jenom jednou nebo dvěma sadami vzorků. V této práci se budeme zabývat všemi vzorky a všemi technologickými parametry, které jsou zadány v tabulce Tab. 4.1.

Celkem byly vytvořeny čtyři sady vzorků označené A, B, C, D. Vzorky A a B byly řezány zaostřovací trubicí o průměru 0,8mm a v případě sad C a D měla zaostřovací trubice průměr 1,4mm. Měnili jsme také hmotnostní tok abraziva. Sada A a C byla řezána hmotnostním tokem  $m_a = 400 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$ . U vzorků B a D byl použit hmotnostní tok o hodnotě  $m_a = 250 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$ . V každé sadě jsou čtyři vzorky čtvercového tvaru. Jednotlivé čtverce v sadě jsou řezány jinou řeznou rychlostí a to 50, 75, 100 a 150  $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ . Dále máme v experimentu čtverce rozdělené na 7 částí.

Náš experiment byl prováděn na dvojpolohovacím stole od Firmy PTV, který je převážně určen na rovinné aplikace dělení materiálu technologií AWJ. Řezná hlavice bylo od firmy Innersoll Rand, typu Autoline<sup>TM</sup>. Použit byl násobič o maximálním tlaku 380 MPa Stream Pump SL III. Při experimentu byl však použit tlak 350MPa pro všechny řezané vzorky.

Během řezání byly snímány vibrace i akustická emise. Vibracemi se zabývají jiné práce např. [15]. Tato diplomová práce je zaměřená na akustickou emisi. Na obr 4.1 je zobrazena i poloha jednotlivých snímačů vibrací.



**Obr. 4.1 Experimentální vzorek**

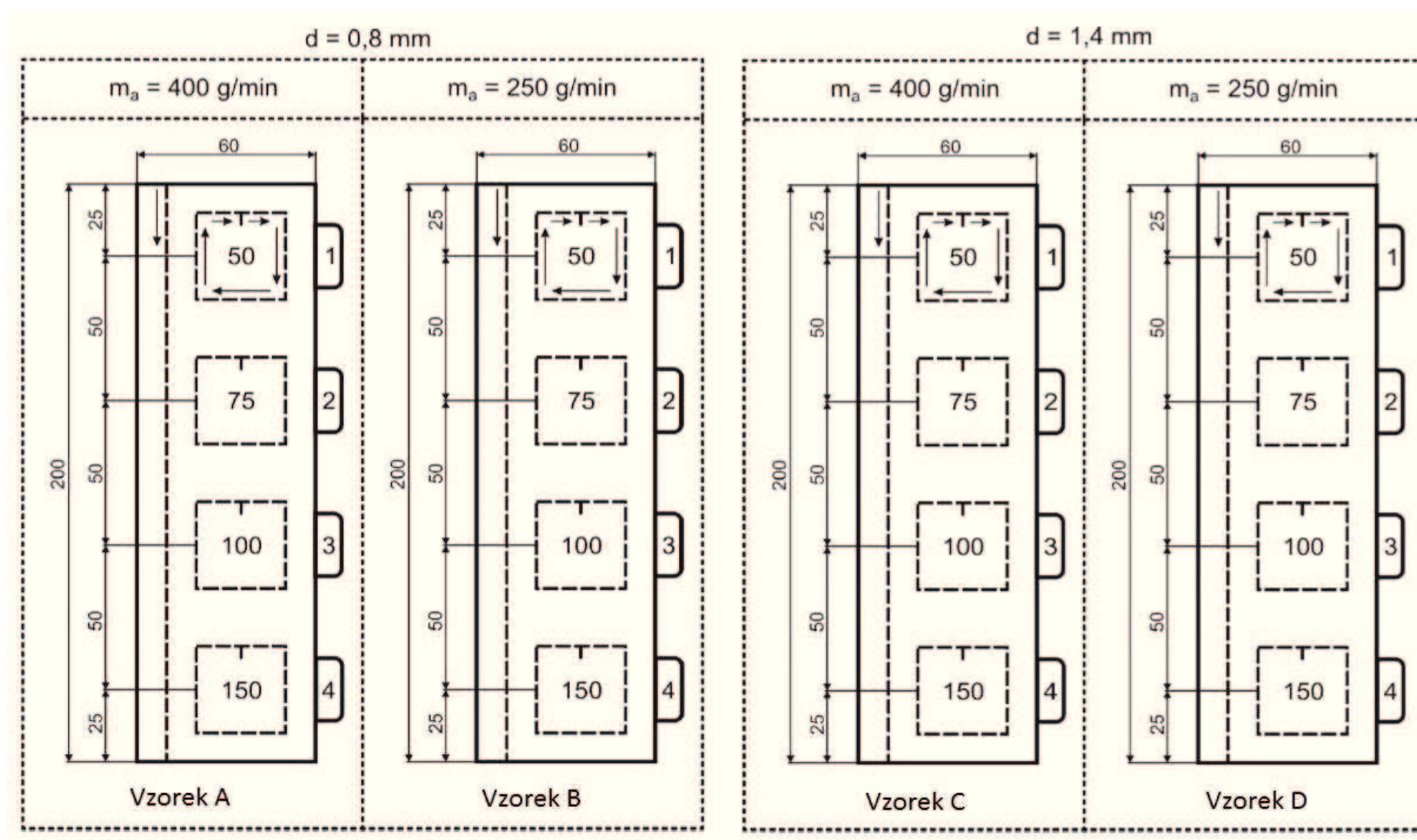


**Obr 4.2 Snímání akustické emise a vybrací v průběhu řezu.**



**Obr. 4.3 Umístění mikrofonu na řezací hlavici**



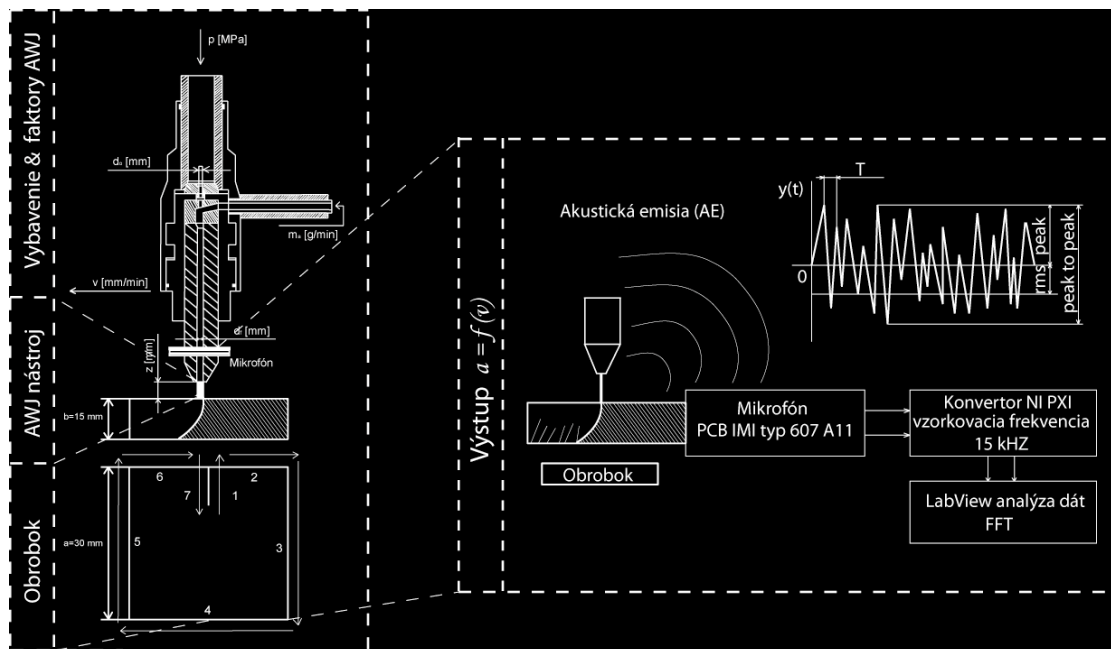


Obr. 4.4. Schéma řezání experimentálních vzorku A, B, C, D.

Sběr dat je vyobrazen na obrázku Obr. 4.5. Byl použit systém NI PXI – 1031, NI PXI – 6109, který umožňuje osmikanálový sběr informací s frekvencí 30kHz. Systémy PXI dokážou synchronizovat naráz až 5000 kanálů. Kanály při měření byly zapojeny takto:

0. Kanál: Šum
1. Kanál: Akcelerometret PCB IMI 607 A11 (vibrace)
2. Kanál: Akcelerometret PCB IMI 607 A11 (vibrace)
3. Kanál: Akcelerometret PCB IMI 607 A11 (vibrace)
4. Kanál: Akcelerometret PCB IMI 607 A11 (vibrace)
5. Kanál: Šum
6. Kanál: Šum
7. Kanál: Mikrofón (akustická emise)

Kanály 0 až 6 jsou pro nás nepodstatné. Zajímají nás informace získané kanálem č.7 tedy mikrofónem. Mikrofón byl umístěn přímo na zaostřovací trubici. Musel být ochráněn před vlhkostí a prachem. Ochranné materiály však nesměli ovlivňovat měření. Aby nepohlcovali nebo nenásobili měřenou akustickou emisi.



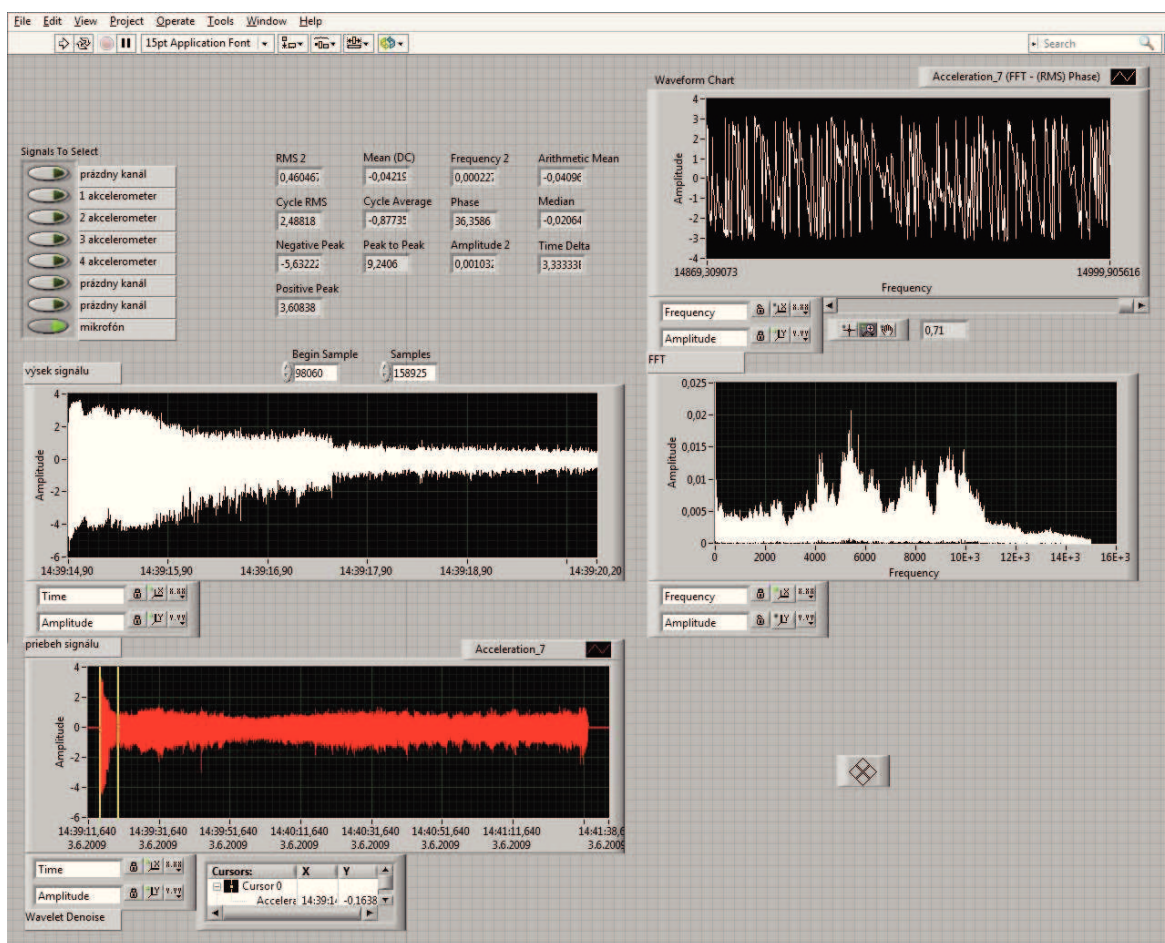
Obr. 4.5 Schéma sběru dat. [4]



## 5. Výsledky experimentu

Naměřené hodnoty byly analyzovány v programovém prostředí LabVIEW od americké National Instruments. Jednotlivé signály byly uloženy v blocích podle jednotlivých řezných rychlostí ve formátu \*.tdms. Tento formát umožňuje zapisování dat z více kanálů do jednoho jediného souboru. Soubor obsahuje velké množství naměřených dat ale zároveň šetří místo na disku počítače

Při analýze dat jsme museli eliminovat data z ostatních kanálů a zajímal nás pouze kanál č.7.



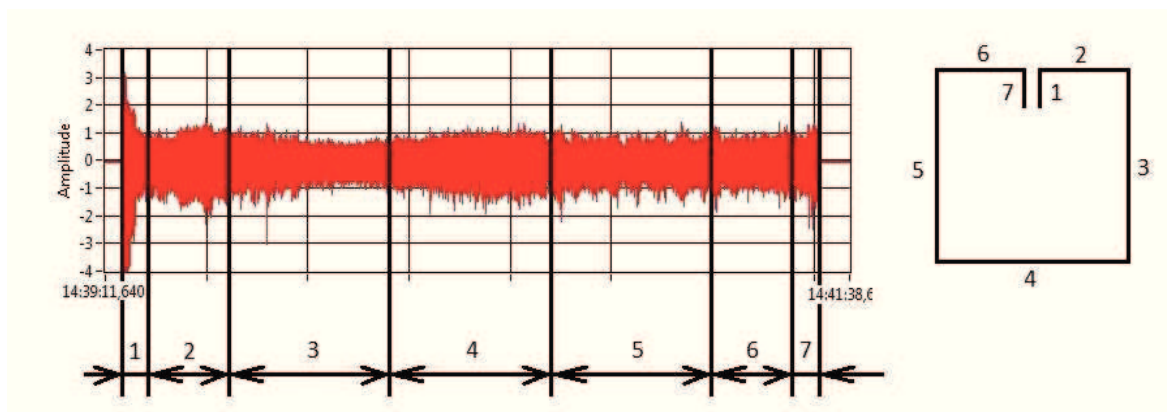
Obr. 5.1 Analýza akustické emise v programovém prostředí LabVIEW

## 5.1. Průběhy signálů akustické emise v čase

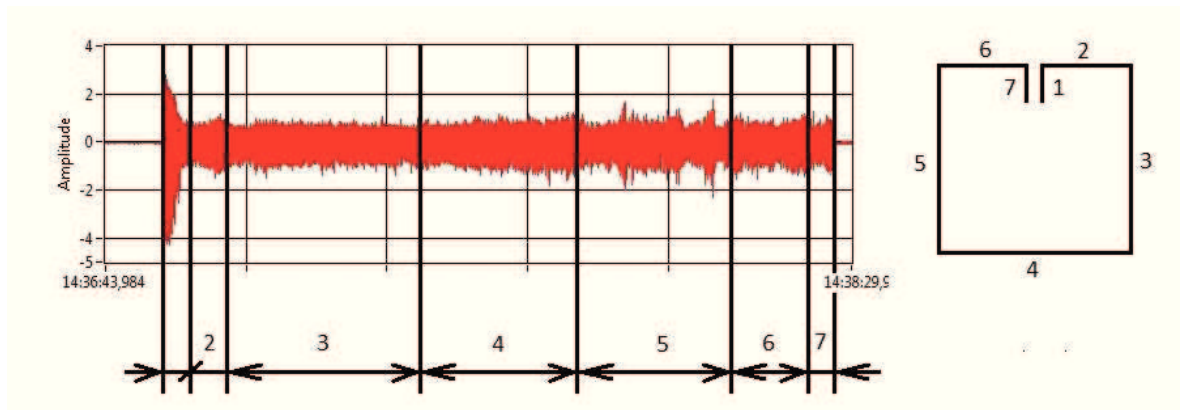
Koncentrace informací u jednotlivých vzorků je obrovská. Nejvíce snímků bylo pořízeno při řezání nejnižší ze zvolených řezných rychlostí  $v = 50 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ . Řezný čas byl logicky nejdelší. Při snímání akustické emise bylo pořízeno přes 4 100 000 snímků. Naopak při řezné rychlosti  $v = 150 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ . Bylo pořízeno okolo 1 600 000 záznamů. I tak ale jde o velké množství dat.

### 5.1.1. Průběhy signálů akustické emise v čase sady vzorků A

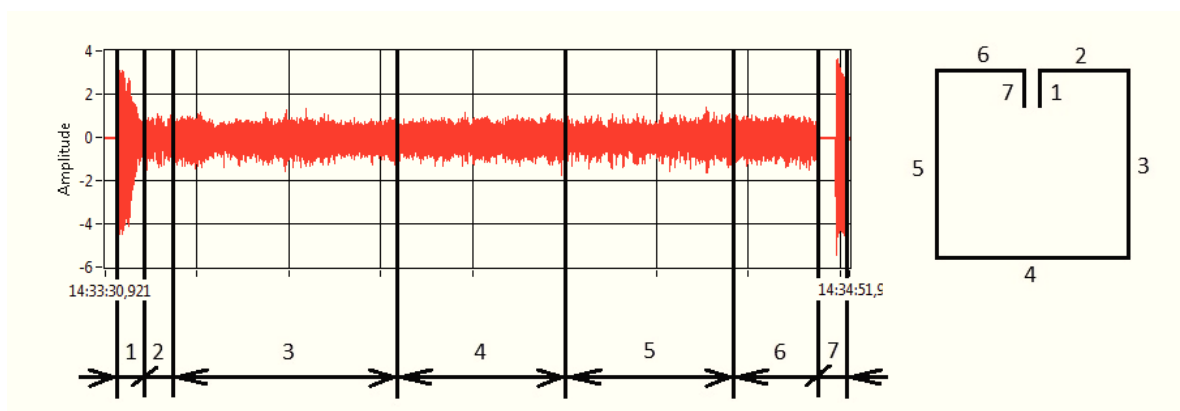
Celá sada vzorků A byla pořízena při stejném nastavení všech řezných parametrů: materiál AISI 309, tloušťka materiálu  $b = 15 \text{ mm}$ , tlak  $p = 350 \text{ MPa}$ , hmotnostní tok abraziva  $m_a = 400 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$ , průměr zaostřovací trubice  $d_f = 0,8 \text{ mm}$ , Mesh 80, abrazivo Barton Garnet. Proměnlivým faktorem při pořizování vzorků sady A byla řezná rychlost. Ta měla hodnoty  $v = 50, 75, 100$  a  $150 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ . Měřené signály akustické emise jsou na obrázcích (Obr.4.2, Obr.4.3, Obr.4.4, Obr.4.5) rozděleny na 7 úseků. Lze tedy rozpoznat, ve kterém úseku se objevují nejvyšší, nebo naopak nejmenší hodnoty amplitud. Při daných rychlostech vidíme, kdy je řez nejstabilnější a při kterých parametrech se stává řez nestabilní.



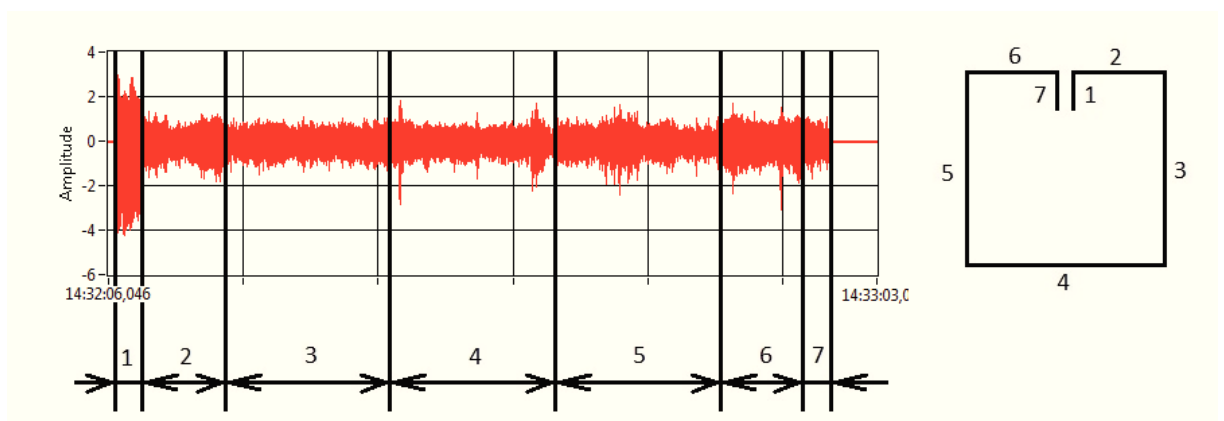
Obr. 5.2 Průběh signálu akustické emise vzorku A, materiál AISI 309,  $b = 15 \text{ mm}$ ,  $v = 50 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $p = 350 \text{ MPa}$ ,  $m_a = 400 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $d_f = 0,8 \text{ mm}$



Obr. 5.3 Průběh signálu akustické emise vzorku A, materiál AISI 309,  $b = 15 \text{ mm}$ ,  $v = 75 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $p = 350 \text{ MPa}$ ,  $m_a = 400 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $d_f = 0,8 \text{ mm}$



Obr. 5.4 Průběh signálu akustické emise vzorku A, materiál AISI 309,  $b = 15 \text{ mm}$ ,  $v = 100 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $p = 350 \text{ MPa}$ ,  $m_a = 400 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $d_f = 0,8 \text{ mm}$



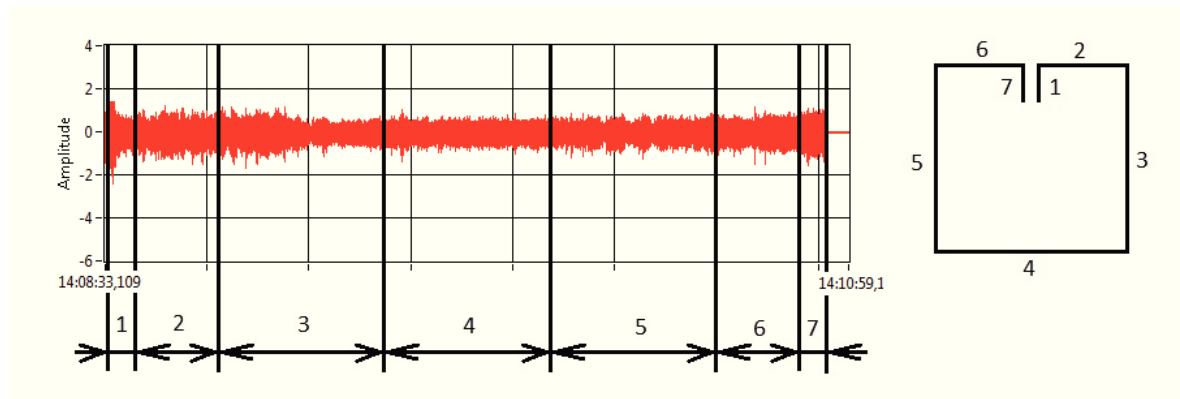
Obr. 5.5 Průběh signálu akustické emise vzorku A, materiál AISI 309,  $b = 15 \text{ mm}$ ,  $v = 150 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $p = 350 \text{ MPa}$ ,  $m_a = 400 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $d_f = 0,8 \text{ mm}$

Nejvyšší hodnoty amplitud byly zjištěny v prvních úsecích. Zde dochází k takzvanému průstřelu materiálu. Při průstřelu materiálu se vytváří řez a hloubka řezu zvětšuje, až dosáhneme 15 mm, což je tloušťka řezaného materiálu.

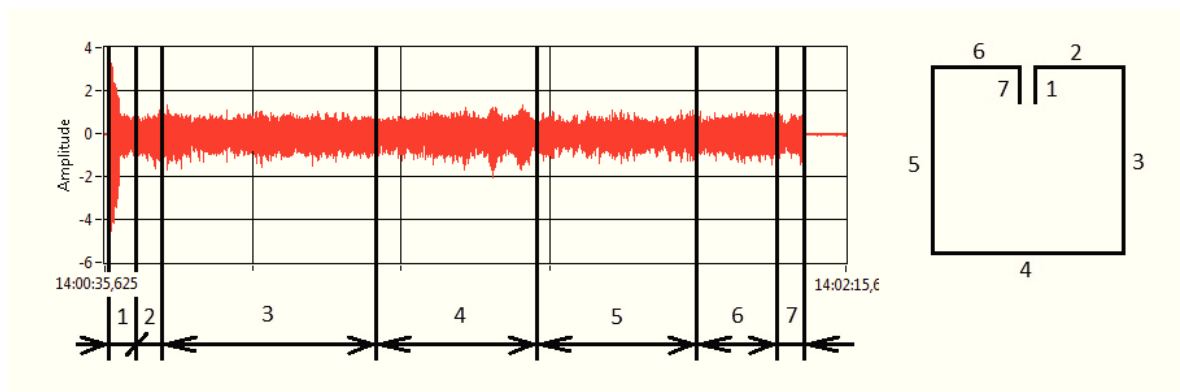
Nakonec, jak dochází k průstřelu materiálu se amplitudy zmenšují a ustálí většinou přibližně na stejných hodnotách. Při rychlosti  $50 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  jsou hodnoty při průstřelu -4 až +3. V průběhu řezu hodnoty mírně kolísají, ale většinou jsou v hodnotách -2 až 1,5 pouze v druhé polovině třetího úseku amplitudy klesly na hodnoty mezi -1 a 0,6. U řezání posuvem  $75 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  se zdají hodnoty amplitud celkově stabilnější. Průstřel je stejný jako předchozí případ a to -4 až +3. Nejstabilnější hodnoty najdeme na třetím úseku. Amplitudy se zde pohybují mezi -1 až +1. Čtvrtý úsek je také stabilní ale hodnoty na něm postupně ale nepatrně rostou. Nestabilní jsou hodnoty na pátém úseku, kde amplitudy rostou a zase klesají mezi hodnotami -2 a +2 a hodnotami -1 a +1. Třetí vzorek má nejstabilnější hodnoty z celé sady A. Byl řezán rychlostí  $v = 100 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ . Hodnoty průstřelu jsou opět beze změny. Po celou dobu řezání jsou amplitudy mezi -1 a +1 bez větších odchylek. Pouze v sedmém úseku se objevují nezvyklé hodnoty, které se už nikde v žádném vzorku, ať už v sadě A nebo ve všech ostatních, neobjevují. Hodnoty jsou v půlce úseku nulové, a na zbylé části se amplitudy pohybují mezi -6 a +4. Je zřejmé, že amplitudy jsou v tomto případě větší, než při samotném průstřelu. Dle mého názoru jsou tyto hodnoty způsobené chybou v měření. Rychlost  $150 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  je z celé sady A nejméně stabilní. Amplitudy po celou dobu řezu kolísají s největšími hodnotami -2 až +2. Hodnoty průstřelu jsou opět stejné (-4 až +3).

### 5.1.2. Průběhy signálů akustické emise v čase sady vzorků B

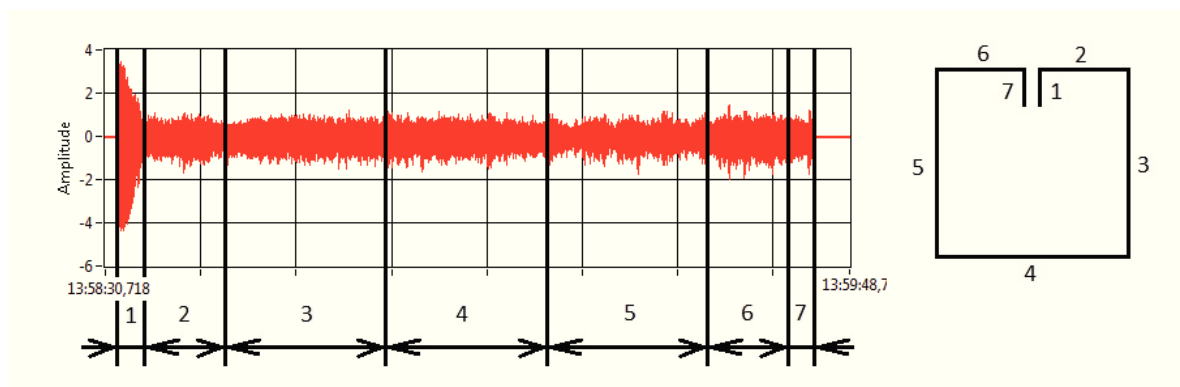
Akustická emise u sady vzorků B byla pořízena při těchto parametrech: materiál AISI 309, tloušťka materiálu  $b = 15 \text{ mm}$ , tlak  $p = 350 \text{ MPa}$ , hmotnostní tok  $m_a = 250 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$ , průměr zaostřovací trubice  $d_f = 0,8 \text{ mm}$ , Mesh 80, abrazivo Barton Garnet. Měnila se pouze řezná rychlost, která měla hodnoty  $v = 50, 75, 100$  a  $150 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ . Průběh akustické emise v čase u vzorků B je vyobrazen na Obr.4.6, Obr.4.7, Obr.4.8, Obr.4.9.



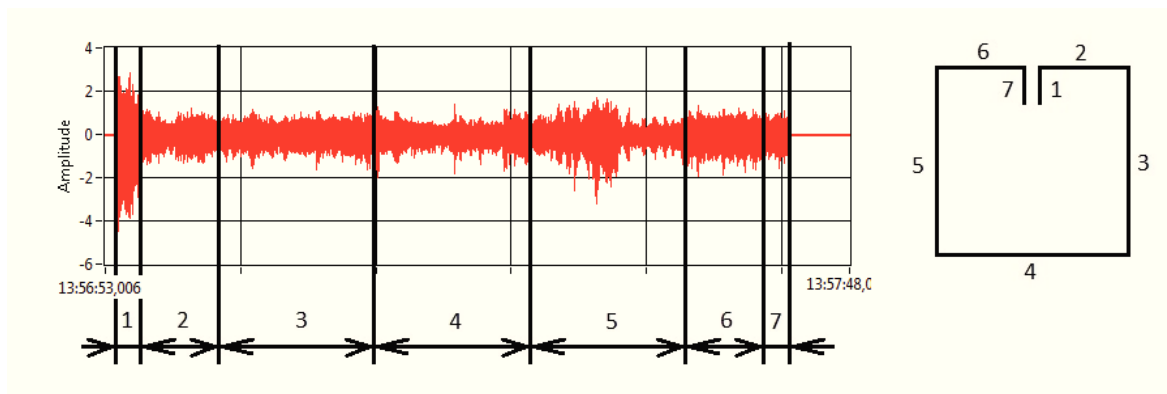
Obr. 5.6 Průběh signálu akustické emise vzorku B, materiál AISI 309,  $b = 15 \text{ mm}$ ,  
 $v = 50 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $p = 350 \text{ MPa}$ ,  $m_a = 250 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $d_f = 0,8 \text{ mm}$



Obr. 5.7 Průběh signálu akustické emise vzorku B, materiál AISI 309,  $b = 15 \text{ mm}$ ,  
 $v = 75 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $p = 350 \text{ MPa}$ ,  $m_a = 250 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $d_f = 0,8 \text{ mm}$



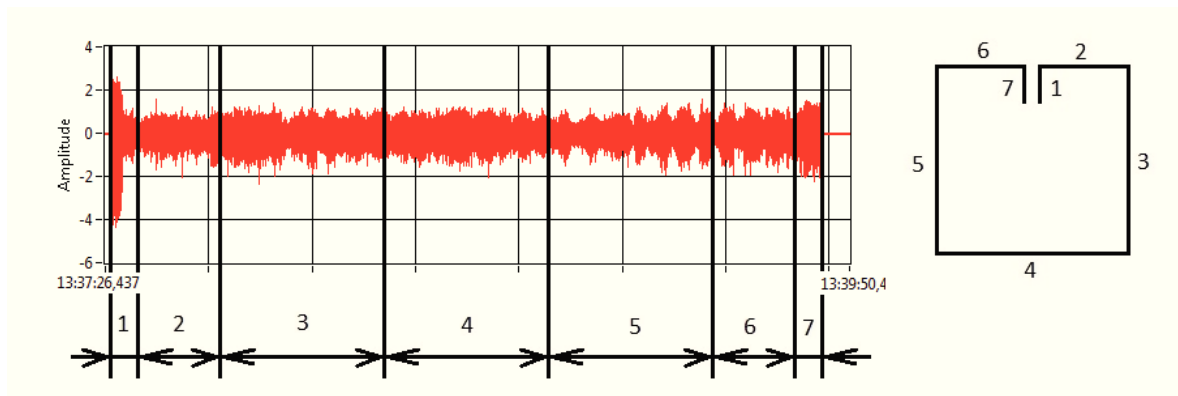
Obr. 5.8 Průběh signálu akustické emise vzorku B, materiál AISI 309,  $b = 15 \text{ mm}$ ,  
 $v = 100 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $p = 350 \text{ MPa}$ ,  $m_a = 250 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $d_f = 0,8 \text{ mm}$



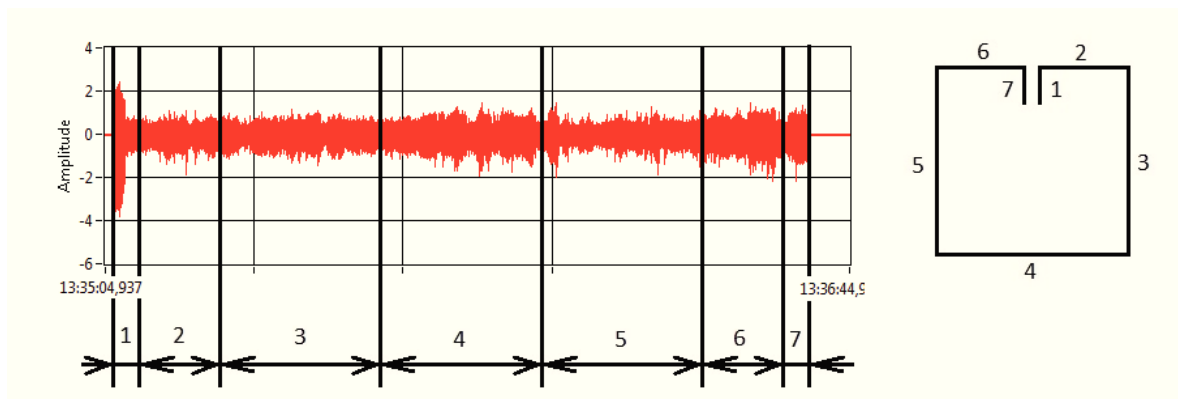
**Obr. 5.9** Průběh signálu akustické emise vzorku B, materiál AISI 309,  $b = 15 \text{ mm}$ ,  
 $v = 150 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $p = 350 \text{ MPa}$ ,  $m_a = 250 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $d_f = 0,8 \text{ mm}$

Zde se již hodnoty amplitud v prvním úseku těchto vzorků mírně mění v závislosti na řezné rychlosti, a nejsou stejné jako u předchozí sady. Výrazně menší hodnoty vidíme při nejmenší rychlosti  $v = 50 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ , kde hodnoty dosahují -2 až +1. Při dalších rychlostech se hodnoty opět pohybují okolo +4 a -4. Při rychlosti  $50 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  jsou amplitudy po celou dobu řezu stabilní. V prvním, v první polovině třetího a v sedmém úseku jsou amplitudy vyšší a dosahují hodnot 1 až -1. V ostatních úsecích je řez stabilní o amplitudách 0,5 až -0,5. U následujících dvou rychlostí ( $75 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $100 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ) jsou projevy akustické emise podobné s hodnotami mezi +1 až -1. Amplitudy pouze při rychlosti  $75 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  zakolísají k hodnotám -2 a +1 v druhé polovině čtvrtého úseku, a při rychlosti posuvu  $100 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  kolísají po celý pátý úsek. Nestabilní amplitudy můžeme vidět při rychlosti řezu  $150 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ . Zde hodnoty kolísají po celou dobu řezání. Průměrně se však hodnoty pohybují mezi -1 a +1. Nejviditelnější změny jsou patrné ve čtvrtém a pátém úseku. Ve čtvrtém úseku se hodnoty při kolísání spíše zmenšují. U pátého úseku si můžeme všimnout výrazného nárůstu amplitud na hodnoty -3 až +2. V druhé polovině tohoto úseku se opět hodnoty zmenší.

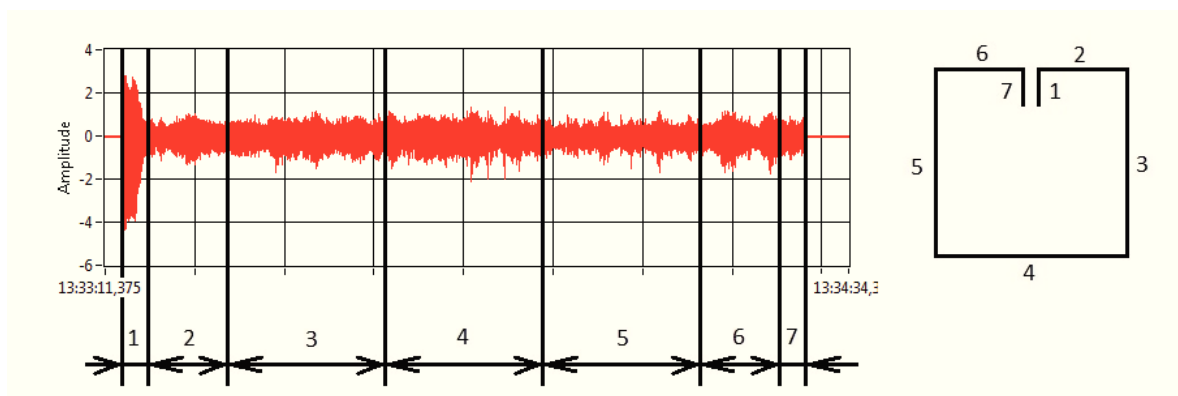
### 5.1.3. Průběhy signálů akustické emise v čase sady vzorků C



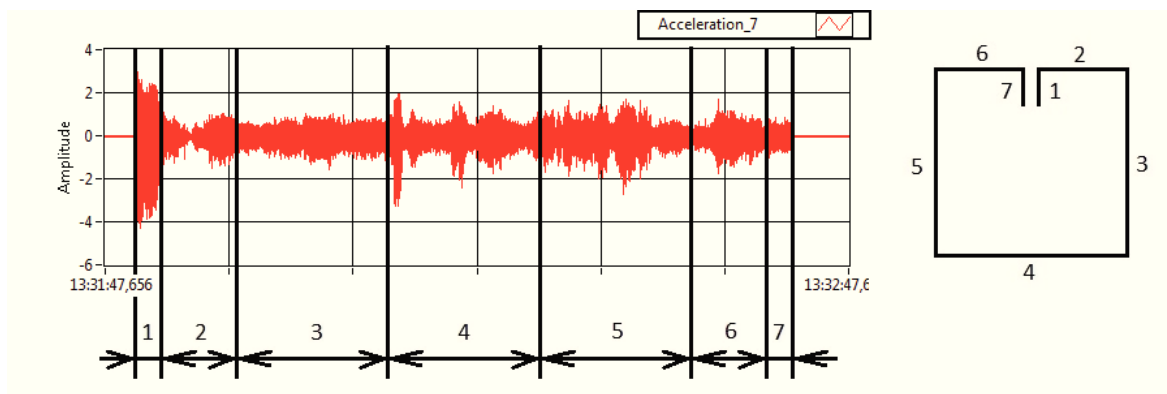
Obr. 5.10 Průběh signálu akustické emise vzorku C, materiál AISI 309,  $b = 15 \text{ mm}$ ,  
 $v = 50 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $p = 350 \text{ MPa}$ ,  $m_a = 400 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $d_f = 1,4 \text{ mm}$



Obr. 5.11 Průběh signálu akustické emise vzorku C, materiál AISI 309,  $b = 15 \text{ mm}$ ,  
 $v = 75 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $p = 350 \text{ MPa}$ ,  $m_a = 400 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $d_f = 1,4 \text{ mm}$



Obr. 5.12 Průběh signálu akustické emise vzorku C, materiál AISI 309,  $b = 15 \text{ mm}$ ,  
 $v = 100 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $p = 350 \text{ MPa}$ ,  $m_a = 400 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $d_f = 1,4 \text{ mm}$



**Obr. 5.13** Průběh signálu akustické emise vzorku C, materiál AISI 309,  $b = 15 \text{ mm}$ ,  
 $v = 150 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $p = 350 \text{ MPa}$ ,  $m_a = 400 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $d_f = 1,4 \text{ mm}$

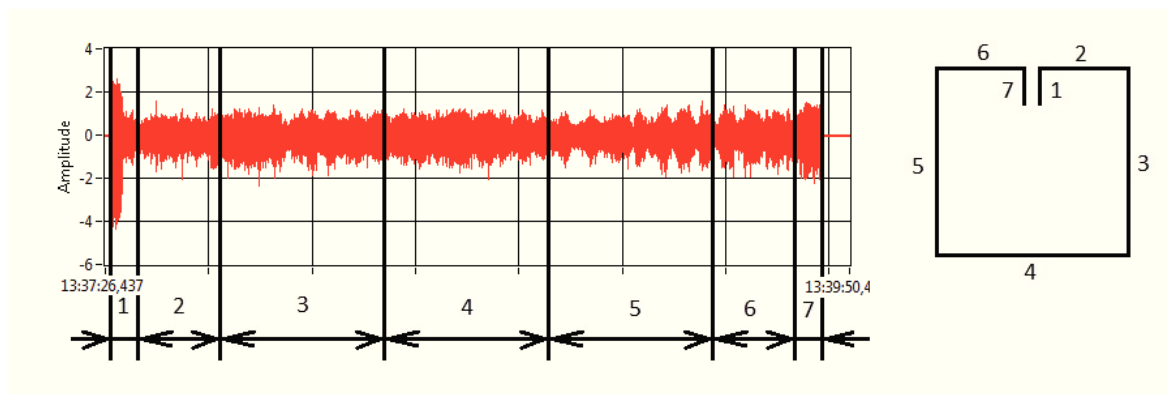
Nastavení řezných parametrů při pořízení sady vzorků C bylo následující: materiál opět AISI 309 o tloušťce 15 mm, Mesh 80, abrazivo Barton Garnet, tlak vodního proudu 350 MPa, hmotnostní tok  $m_a = 400 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$ , průměr zaostřovací trubice  $d_f = 1,4 \text{ mm}$ . Proměnlivá řezná rychlost  $v = 50, 75, 100 \text{ a } 150 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ .

I u těchto vzorků jsou viditelné vysoké hodnoty amplitud při průstřelu materiálu v prvním úseku. Amplitudy se při rychlostech  $50 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $75 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $100 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  pohybují přibližně ve stejných hodnotách po celou dobu řezu. Při nejnižší rychlosti má akustická emise tendenci periodicky kolísat. Toto kolísání je dobře viditelné v pátém a šestém úseku. Hodnoty amplitud se zvyšující se rychlostí na hodnotu  $100 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  zmenšují. U rychlosti posuvu  $75 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  se hodnoty ve čtvrtém a šestém úseku mírně zvýšily na hodnoty  $-2$  až  $+1$ . Třetí řezná rychlost vykazuje nejnižší amplitudy s mírným periodickým kolísáním a hodnoty místy vzrostou na  $-2$  až  $+1$ . Rychlost  $150 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  je nestabilní. Hodnoty zde prudce stoupají a zase klesají po téměř po celou dobu řezu. Amplitudy se blíží ve čtvrtém a pátém úseku k hodnotám  $-3$  až  $+2$ .

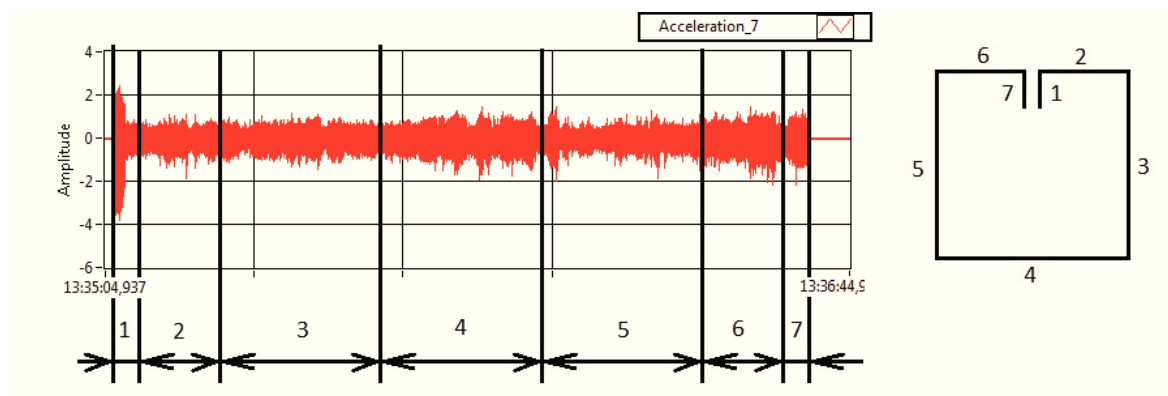


#### 5.1.4. Průběhy signálů akustické emise v čase sady vzorků D

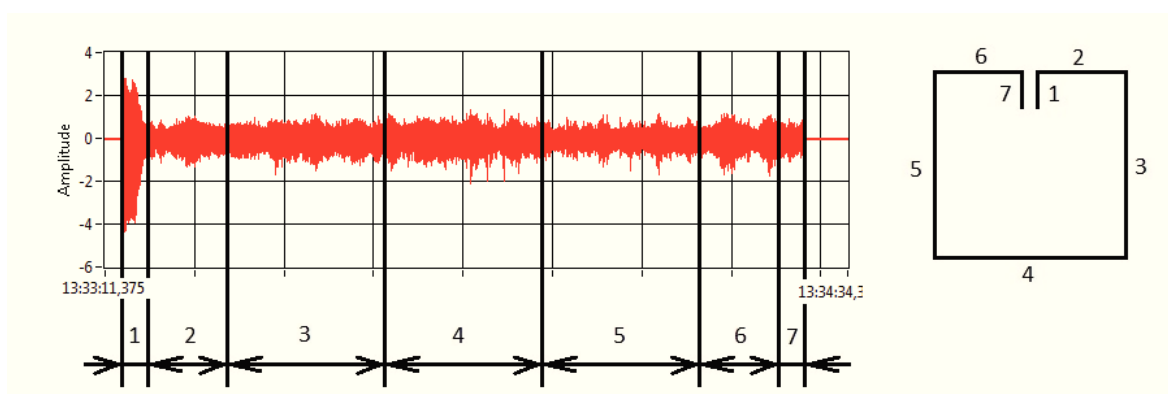
Poslední sada projevů akustické emise u vzorků D byla pořízena při řezání materiálu AISI 309 při těchto parametrech. Tloušťka řezaného materiálu  $b = 15 \text{ mm}$ , tlak  $350 \text{ MPa}$ , hmotnostní tok  $m_a = 250 \text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$ , průměr zaostřovací trubice  $d_f = 1,4 \text{ mm}$ . Proměnlivá řezná rychlost  $v = 50, 75, 100 \text{ a } 150 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ . Mesh 80, abrazivo Barton Garnet,



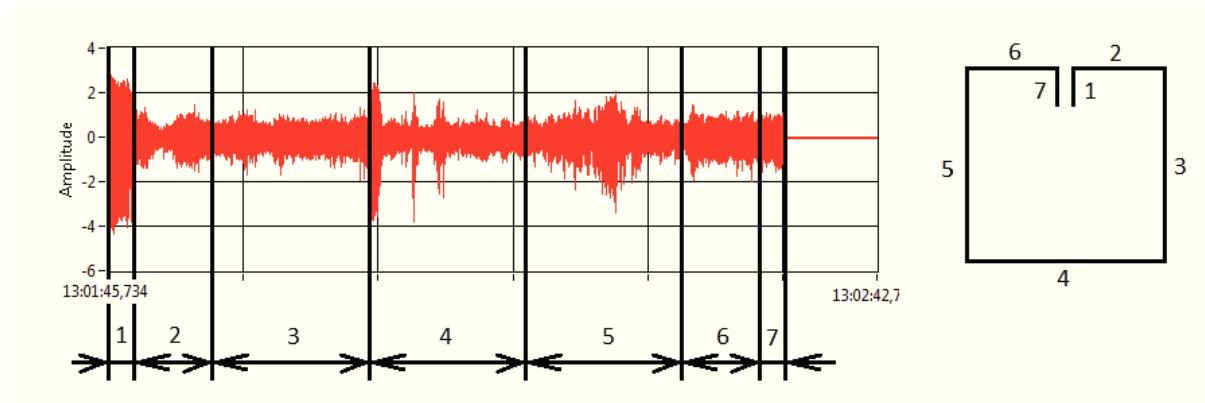
Obr. 5.14 Průběh signálu akustické emise vzorku D, materiál AISI 309,  $b = 15 \text{ mm}$ ,  $v = 50 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ ,  $p = 350 \text{ MPa}$ ,  $m_a = 250 \text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$ ,  $d_f = 1,4 \text{ mm}$



Obr. 5.15 Průběh signálu akustické emise vzorku D, materiál AISI 309,  $b = 15 \text{ mm}$ ,  $v = 75 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ ,  $p = 350 \text{ MPa}$ ,  $m_a = 250 \text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$ ,  $d_f = 1,4 \text{ mm}$



**Obr. 5.16** Průběh signálu akustické emise vzorku D, materiál AISI 309,  $b = 15 \text{ mm}$ ,  
 $v = 100 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $p = 350 \text{ MPa}$ ,  $m_a = 250 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $d_f = 1,4 \text{ mm}$



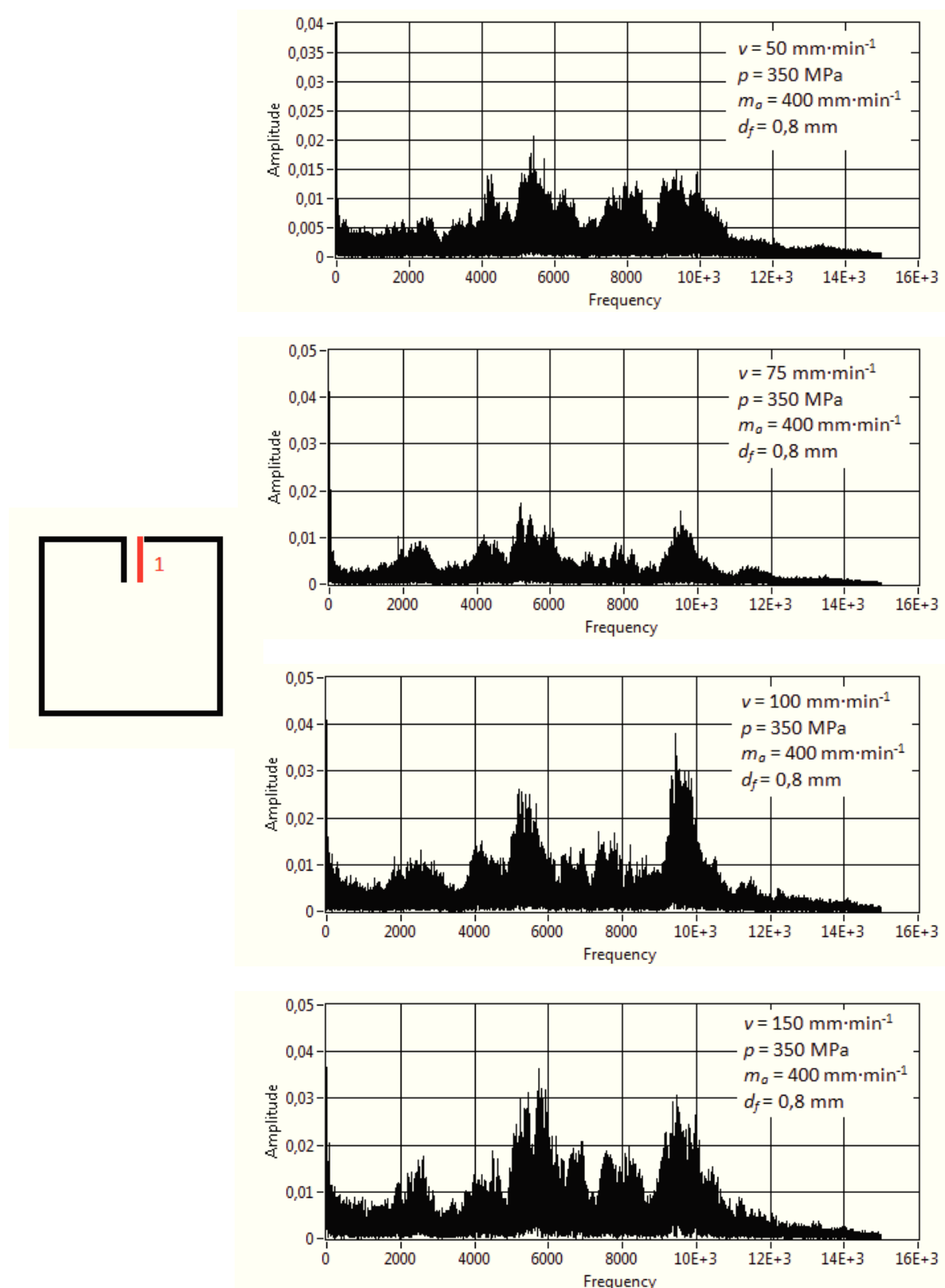
**Obr. 5.17** Průběh signálu akustické emise vzorku D, materiál AISI 309,  $b = 15 \text{ mm}$ ,  
 $v = 150 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $p = 350 \text{ MPa}$ ,  $m_a = 250 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $d_f = 1,4 \text{ mm}$

Akustické signály jsou velmi podobné signálům ze sady C. Velikost amplitud s rychlostí rostoucí od  $50 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  do  $100 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  klesá, ale už ne tak výrazně. Charakteristika akustické emise při rychlosti  $50 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  je prakticky stejná. Opět signál hlavně v pátém a šestém úseku periodicky kolísá. I při druhé rychlosti se signál chová téměř stejně. Objevují se zde amplitudy po celou dobu řezu o stejných hodnotách s výjimkou čtvrtého a šestého úseku, kde se hodnota amplitud mírně zvětšuje. Hodnoty přesahují  $+1$  a přibližují se k  $-2$ . Rychlost  $100 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  má opět nejnižší akustickou emisi. Amplitudy zde mírně periodicky kolísají jak u vzorku C při stejné rychlosti. Při posuvu  $150 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  amplitudy opět v průběhu řezu rychle prudce rostou a opět klesají. Zvýšení amplitud se objevuje na stejných místech jako u vzorku C, ale s vyššími hodnotami. Na začátku čtvrtého úseku dosahují amplitudy téměř stejných hodnot jako pru průstřelu materiálu v prvním úseku. Průstřely jsou zde opět dobře rozpoznatelné.

## **5.2. Frekvenční analýza**

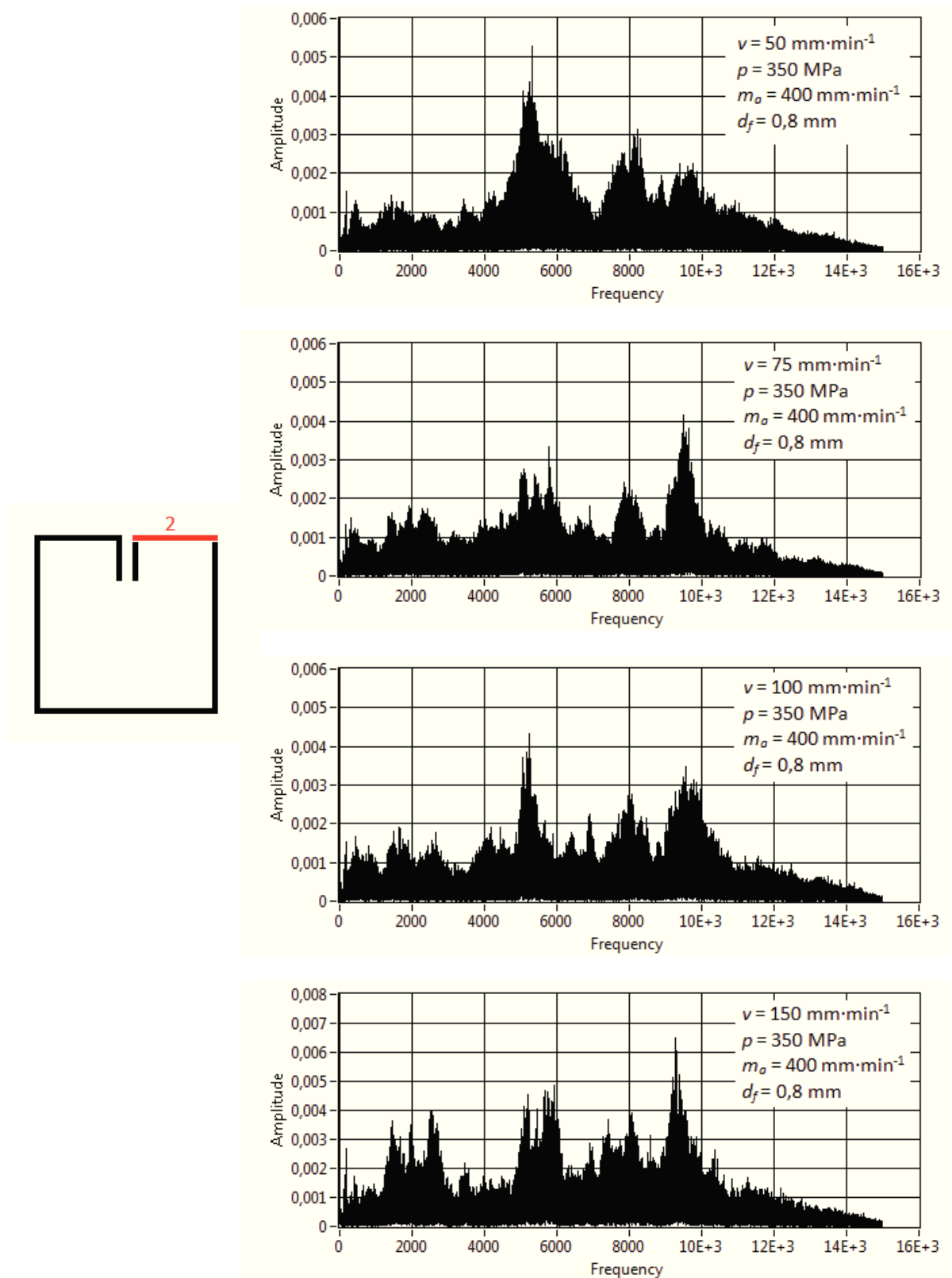
Byly analyzovány také FFT spektra akustických emisí. Je to Fourierova transformace, ve které je signál transformovaný z amplitudo-časového pohledu do amplitudo-frekvenčního záznamu. Zde můžeme hledat určitý periodický charakter u amplitud v závislosti na frekvenčním pásmu. Pokud najdeme periodické složky, je možné, je pak v budoucnu s určitou pravděpodobností předvídat. Na následujících obrázcích jsou zobrazeny FFT spektrální analýzy pro čtyři řezné rychlosti vždy pouze pro jeden úsek.

## 5.2.1. Analýza FFT spekter sady vzorků A



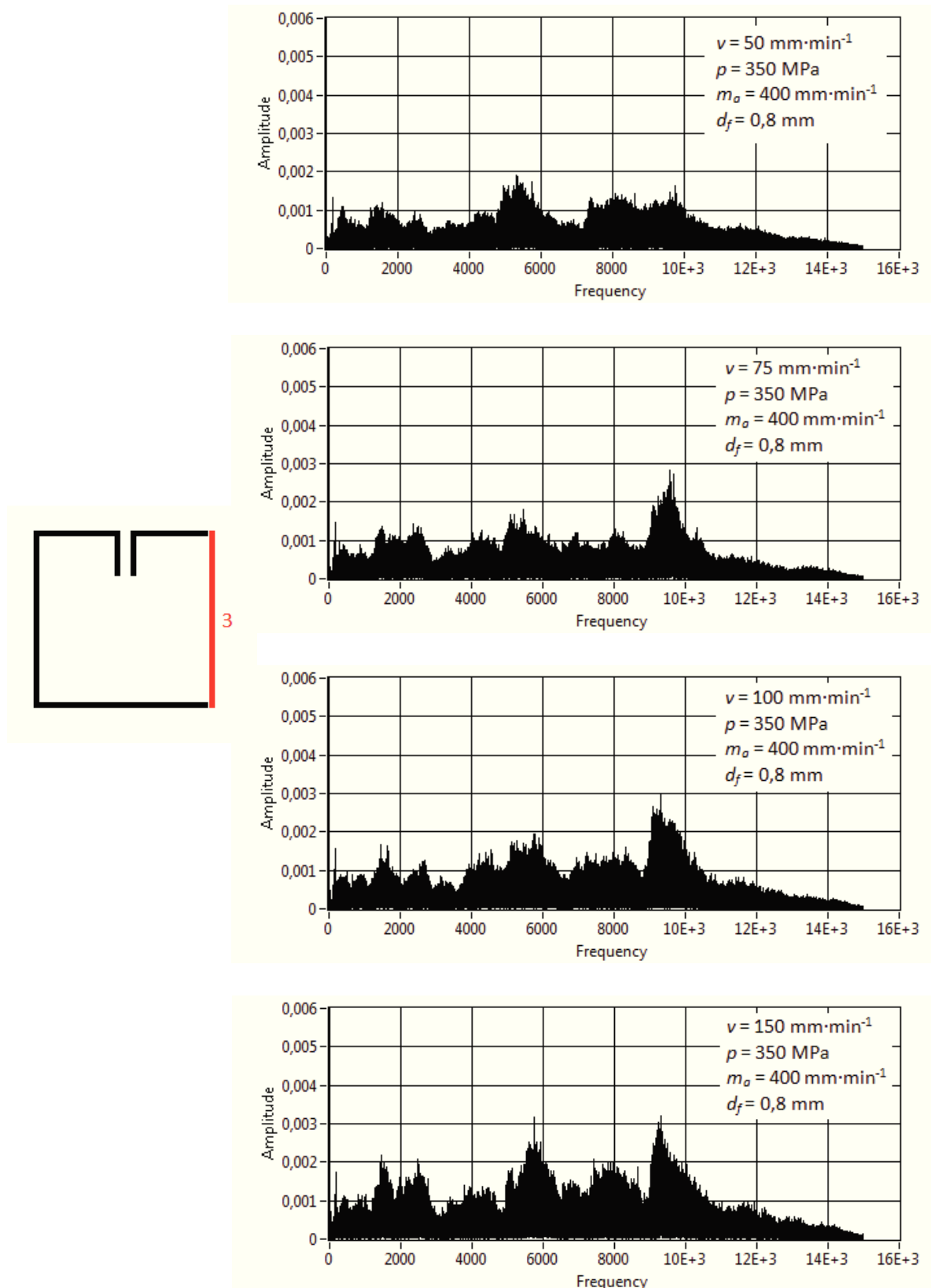
Obr. 5.18 Porovnání FFT spekter úseku 1 vzorku A, materiálu AISI 309,  $b = 15 \text{ mm}$  při čtyřech rychlostech kde  $v_1 = 50 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $v_2 = 75 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $v_3 = 100 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $v_4 = 150 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $p = 350 \text{ MPa}$ ,  $m_a = 400 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $d_f = 0.8 \text{ mm}$

Na obrázku Obr. 5.18 jsou signály FFT spekter akustické emise pro první úsek sady vzorků A. jsou zde čtyři grafy pro čtyři rychlosti posuvu řezné hlavy. Spektrum pro rychlost  $50 \text{ mm.min}^{-1}$  se od ostatních jevíce liší. Hned na nulové frekvenci je amplituda na hodnotě 0,01, ale hned klesá k 0,005, kde zůstává až do 4kHz, s výjimkou 3kHz kde amplituda klesá na poloviční hodnoty. Od frekvence se amplitudy na čtyřech místech výrazně zvyšují. Na frekvenci 4,1 amplituda dosahuje hodnot 0,014. Druhé navýšení je na oblasti od 5kHz do 6,3kHz kde v jednom místě amplituda dosahuje až na 0,02. To je nejvyšší hodnota při rychlosti řezu  $5 \text{ mm.min}^{-1}$ . Třetí vrchol dosahuje hodnot 0,13 při frekvenci od 5 kHz do 7kHz. Od 7 kHz do 10kHz je amplituda na hodnotách 0,5 a pozvolna klesá kde před 11kHz je amplituda pod hodnotou 0,005. Při následujících třech rychlostech si jsou spektra tvarově podobná a vrcholy amplitud mají přibližně na stejných frekvencích. Amplitudy o vysokých hodnotách najdeme hned na nulové frekvenci. Jsou zde nejvyšší hodnoty pohybující se okolo 0,04. Následně však klesá k hodnotám 0,005. U rychlosti  $75 \text{ mm.min}^{-1}$  mají amplitudy v průměru nejmenší hodnoty a nepřesahují 0,02. Jsou zde čtyři vrcholy amplitud na frekvencích 2,5kHz, 4,1 kHz, 5 kHz, a 9,5 kHz. Na frekvenci 4,1 jsou amplitudy nejvyšší. Při rychlostech  $100 \text{ mm.min}^{-1}$  a  $150 \text{ mm.min}^{-1}$  se objevuje 5 výraznějších vrcholů. Rychlost  $100 \text{ mm.min}^{-1}$  má hodnoty amplitud pod 0,01 a okolo frekvencí 2,5kHz, 4 kHz, 7,5 kHz tuto hodnotu překračuje, s výjimkou dvou vrcholů, které jsou výrazně vyšší. Od 5kHz do 6kHz je amplitudy na 0,025 a na frekvenci 9,5kHz dosahuje amplituda nejvyšších hodnot a to 3,8. Amplitudy u rychlosti  $150 \text{ mm.min}^{-1}$  jsou přibližně na stejných místech ale dvě nejvyšší mají jiné hodnoty. Na frekvenci od 5kHz do 6kHz dosahuje amplituda hodnoty 3,7 a okolo 9,5kHz je amplituda o velikosti 0,03.



Obr. 5.19 Porovnání FFT spekter úseku 2 vzorku A, materiálu AISI 309,  $b = 15 \text{ mm}$  při čtyřech rychlostech kde  $v_1 = 50 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $v_2 = 75 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $v_3 = 100 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $v_4 = 150 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $p = 350 \text{ MPa}$ ,  $m_a = 400 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $d_f = 0.8 \text{ mm}$

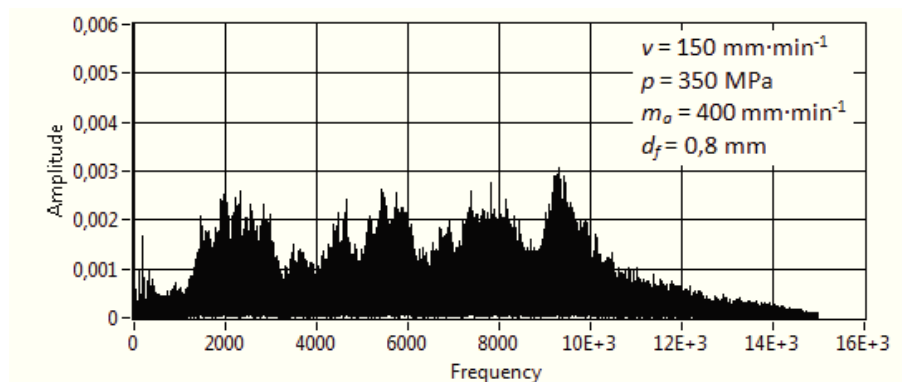
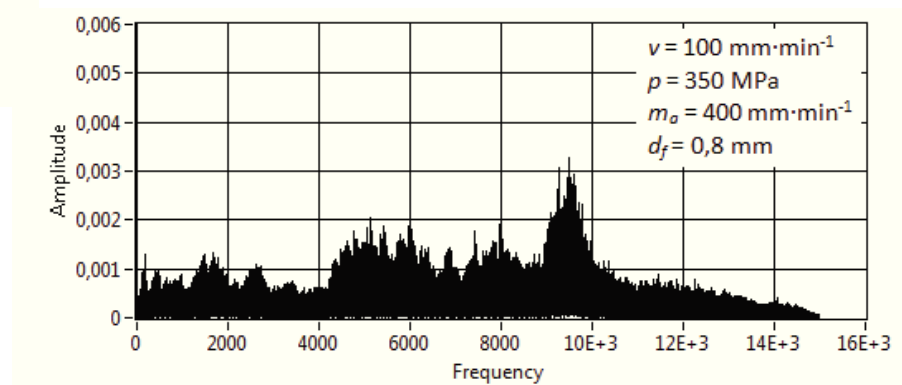
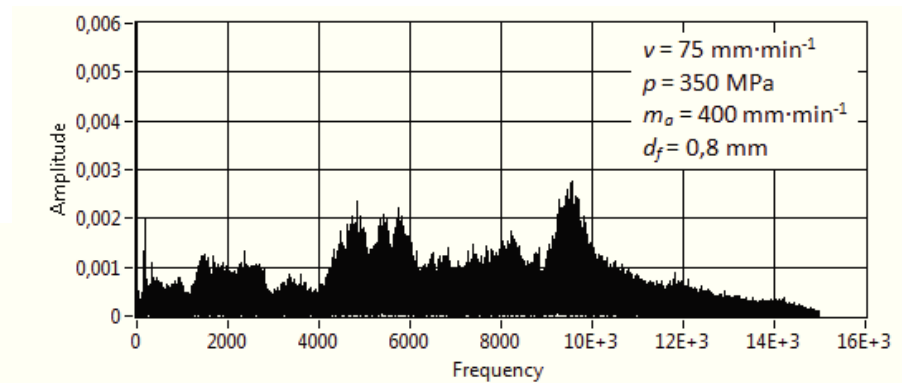
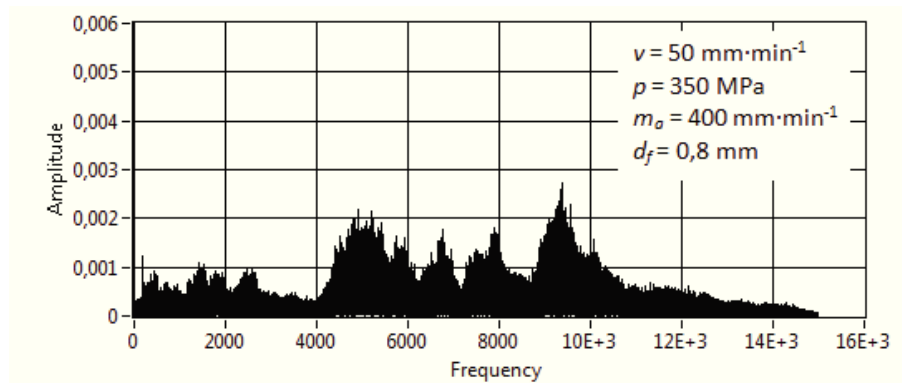
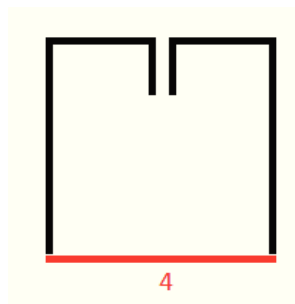
Na obrázku Obr. 5.19 jsou FFT spektra pro druhý úsek při rychlostech 50 mm.min<sup>-1</sup>, 75 mm.min<sup>-1</sup>, 100 mm.min<sup>-1</sup>, 150 mm.min<sup>-1</sup>. U posuvu 50 mm.min<sup>-1</sup> se hodnoty spekter do frekvence 4kHz pohybují okolo 0,001. Od 4kHz se hodnoty amplitud postupně zvyšují, až dosáhnou 0,005 na frekvenci 5kHz. Dále hodnoty postupně klesají a u 7kHz mají opět na chvíli původní hodnoty. Následují další dva vrcholy. První, kde amplitudy dosahují 0,003 na frekvenci 8kHz, a druhý na 9,5kHz o hodnotě 0,2. Od 10kHz pozvolna amplitudy klesají a na 15kHz se blíží téměř nule. Spektra nejpomalejšího posuvu se od ostatních spekter nejvíce liší. Rychlost 75 mm.min<sup>-1</sup> má tři výraznější vrcholy, které přesahují hodnoty 0,002. Na frekvenci 1kHz až 3kHz se amplitudy pouze přibližují k této hodnotě. Od 5kHz se hodnoty amplitud blíží 0,003 a v jednom místě dokonce tuto hranici amplituda překročí. Další vrchol je okolo 8kHz. Poslední a nejvyšší vrchol je vidět od 9kHz do 10kHz. Nejvyšší amplituda v tomto rozsahu frekvencí přesáhla hodnotu 0,004. Spektrum FFT pro rychlost 100 mm.min<sup>-1</sup> je nejstálější. Amplitudy se ve svých vrcholcích většinou přibližují hodnotě 0,002. Ve třech případech tři vrcholy tuto hranici překonají. Na frekvenci 5kHz je amplituda u této rychlosti nejvyšší. Přesahuje hodnotu 0,004. Druhý výrazný nárůst amplitud je patrný okolo 8kHz a přibližují se k hodnotě 0,003. Od 9kHz do 10kHz se objevuje další vrchol o hodnotě 0,0035. Poslední rychlost dosahuje nejvyšších hodnot amplitud. Na rozsahu od 1kHz do 3kHz amplitudy přesahují hodnotu 0,002 a přibližují se k hranici 0,004. Od 5kHz do 10kHz jsou amplitudy většinou větší jak 0,002. Jsou zde patrné tři nárůsty amplitud, které mají hodnoty 0,005, 0,004 a 0,0065. První vrcholek se nachází na oblasti 5kHz až 6kHz, druhý okolo 8kHz, a třetí na frekvenci 9kHz.



Obr. 5.20 Porovnání FFT spekter úseku 3 vzorku A, materiálu AISI 309,  $b = 15 \text{ mm}$  při čtyřech rychlostech kde  $v_1 = 50 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $v_2 = 75 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $v_3 = 100 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $v_4 = 150 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $p = 350 \text{ MPa}$ ,  $m_a = 400 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $d_f = 0.8 \text{ mm}$

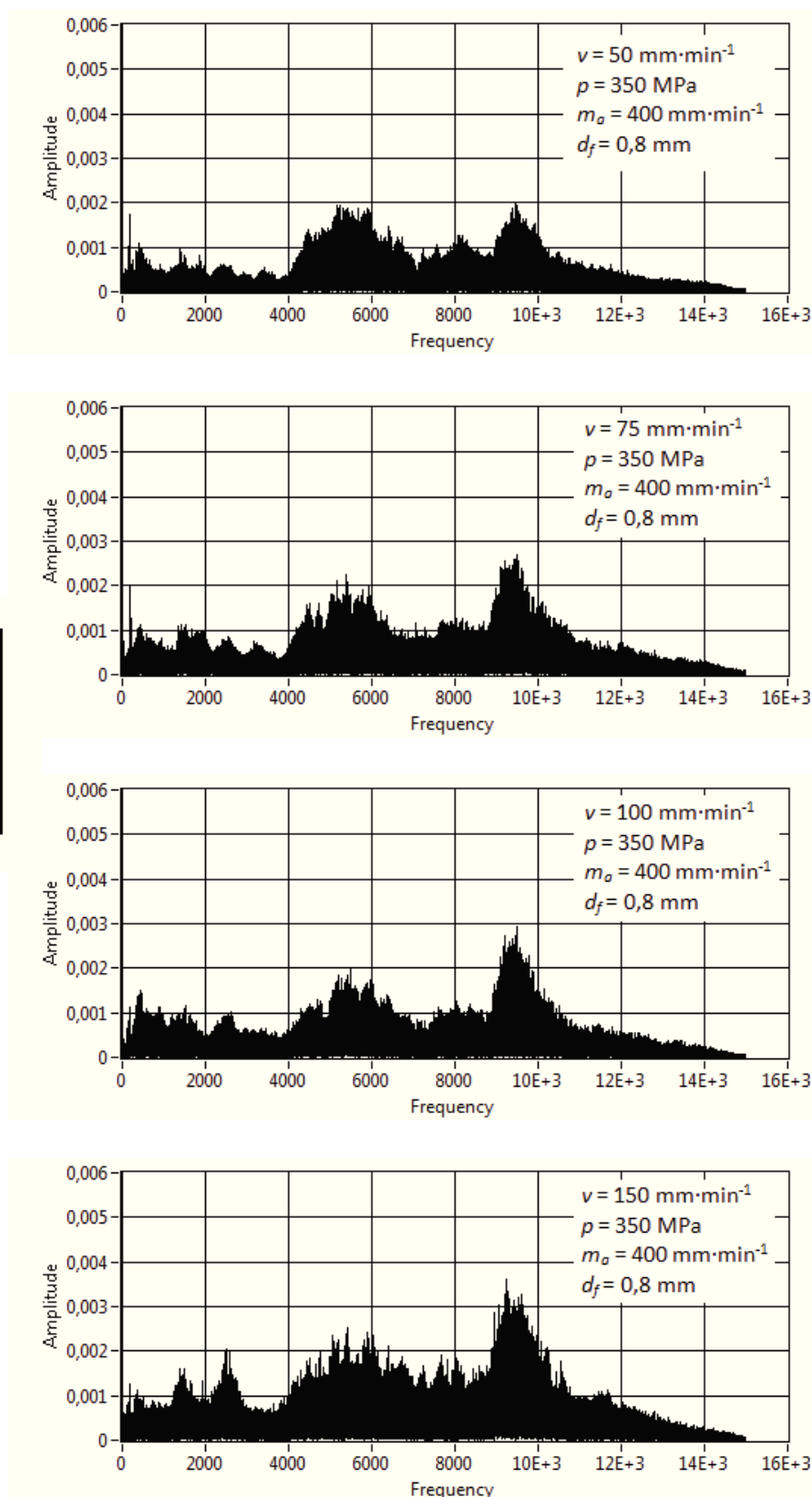
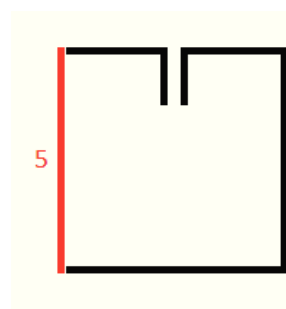


Porovnání FFT spekter na třetím úseku pro sadu vzorků A pro čtyři různé posuvové rychlosti jsou na obrázku Obr. 5.20. U rychlosti  $50 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  jsou hodnoty amplitud celkově nejnižší. Do frekvence  $4,9 \text{ kHz}$  se amplitudy pohybují pod hodnotou  $0,001$  až na dva vrcholky amplitud v rozmezí  $0$  až  $2 \text{ kHz}$ , které tuto hodnotu překonají. Od  $5 \text{ kHz}$  po  $6 \text{ kHz}$  se zjevuje výraznější nárůst amplitud. V tomto rozsahu dosahují nejvyšších hodnot. V Oblasti  $7 \text{ kHz}$  až  $10 \text{ kHz}$  jsou amplitudy stabilně nad hranicí  $0,001$ . Druhá posuvová rychlost má zhruba polovinu amplitud nad hodnotou  $0,001$ . Od frekvence  $5 \text{ kHz}$  do  $6 \text{ kHz}$  je výraznější vrcholek které se blíží hodnotě  $0,002$ . Mezi  $9 \text{ kHz}$  a  $10 \text{ kHz}$  je nejvyšší vrcholek amplitud s hodnotou mírně pod  $0,003$ . Rychlosti  $100 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  a  $150$  mají podobný průběh amplitud, jako jsou u rychlosti  $75 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ . Nejvyšší hodnota  $0,003$  je také v rozsahu frekvencí  $9 \text{ kHz}$  a  $10 \text{ kHz}$ . Rychlost  $150 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  má však ještě jednu amplitudu, která této hodnoty dosahuje. Můžeme ji najít ve vrcholku mezi frekvencemi  $5 \text{ kHz}$  a  $5 \text{ kHz}$ . Další vyšší hodnoty jsou okolo  $2 \text{ kHz}$  a  $8 \text{ kHz}$ . Okolo těchto frekvencí amplitudy dosahují hodnoty  $0,002$ . Na třetím úseku se opět spektra u rychlostí  $75 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $100 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  a  $150 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  tvarově podobají.



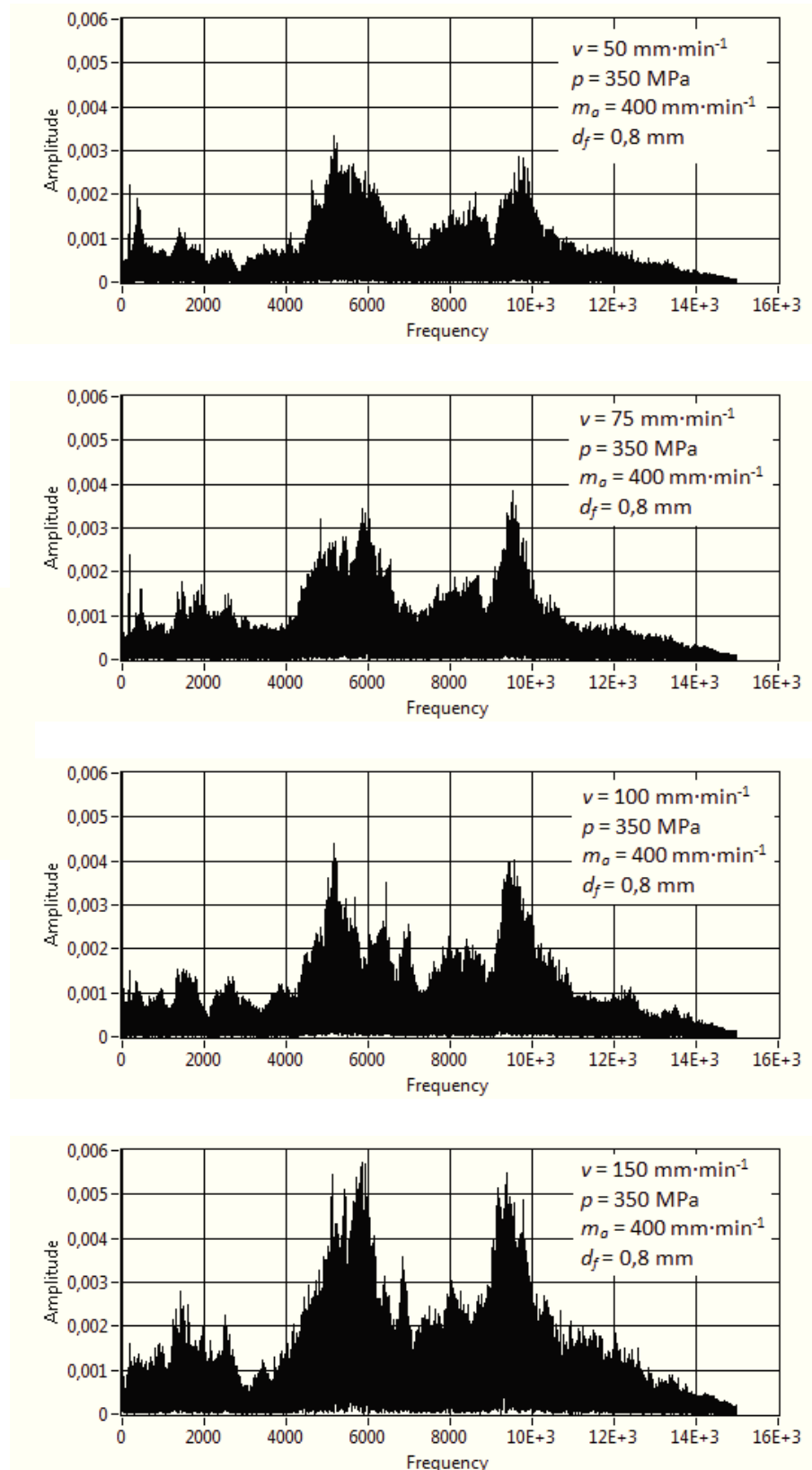
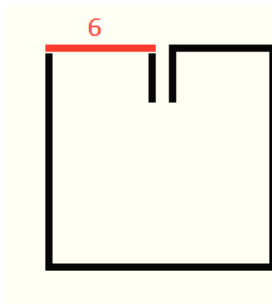
Obr. 5.21 Porovnání FFT spekter úseku 4 vzorku A, materiálu AISI 309,  $b = 15 \text{ mm}$  při čtyřech rychlostech kde  $v_1 = 50 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $v_2 = 75 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $v_3 = 100 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $v_4 = 150 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $p = 350 \text{ MPa}$ ,  $m_a = 400 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $d_f = 0.8 \text{ mm}$

Na Obr. 5.21 jsou spektra pro čtvrtý úsek vzorků A. Zde si můžeme všimnout, že amplitudy u rychlosti  $50 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  nejsou do frekvence  $4 \text{ kHz}$  výrazné. Od této frekvence však hodnoty amplitud narůstají a okolo  $5 \text{ kHz}$  přesáhnou hodnotu  $0,002$ . Dále se objevují další tři vrcholky těsně pod touto hranicí. Jsou na frekvencích  $5,9 \text{ kHz}$ ,  $6,8 \text{ kHz}$  a  $8 \text{ kHz}$ . Nejvyšší amplitudy se blíží hodnotě  $0,003$ . Jsou ve vrcholku na oblasti od  $9 \text{ kHz}$  až  $10 \text{ kHz}$ . FFT spektra pro rychlosti posuvu řezné hlavy  $v = 75 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  a  $v = 100 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  jsou opět tvarově a velikostí amplitud přibližně stejná. Do frekvence  $4 \text{ kHz}$  jsou amplitudy na nižších hodnotách. Od  $4 \text{ kHz}$  až po  $6 \text{ kHz}$  u rychlosti  $75 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  dosahují amplitudy  $0,002$ . U rychlosti  $100 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  dosahují vrcholky amplitud této hodnoty od  $4 \text{ kHz}$  až po  $8 \text{ kHz}$ . U obou těchto rychlostí jsou nejvyšší amplitudy v místě  $9,5 \text{ kHz}$ . Pohybují se okolo hodnot  $0,003$ . Rychlost  $150 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  opět vykazuje nejvyšší hodnoty amplitud v téměř celém rozsahu frekvencí ze všech čtyř posuvových rychlostí. Do  $1 \text{ kHz}$  se amplitudy pohybují pod  $0,001$ . Od tohoto místa dále se amplitudy zvyšují. Jsou zde čtyři vrcholky, které se pohybují okolo hodnoty  $0,0025$ . Najdeme je mezi  $1 \text{ kHz}$  a  $9 \text{ kHz}$ . Nejvyšší vrcholek je opět na frekvenci mezi  $9 \text{ kHz}$  a  $10 \text{ kHz}$  a má hodnotu  $0,003$ .



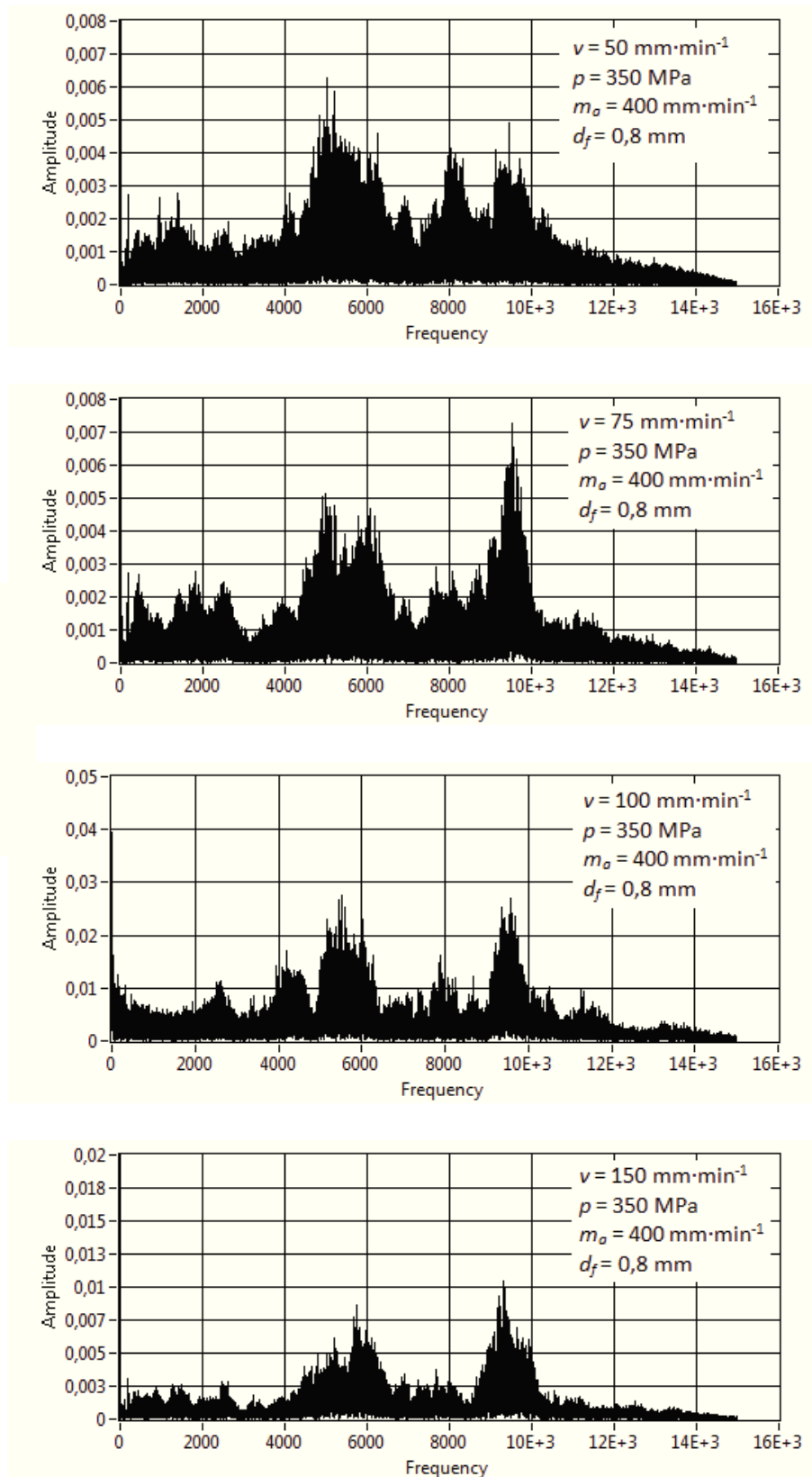
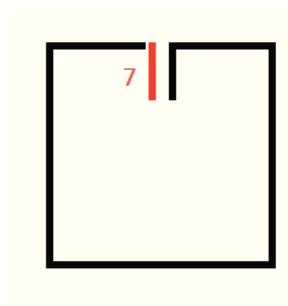
Obr. 5.22 Porovnání FFT spekter úseku 5 vzorku A, materiálu AISI 309,  $b = 15 \text{ mm}$  při čtyřech rychlostech kde  $v_1 = 50 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $v_2 = 75 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $v_3 = 100 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $v_4 = 150 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $p = 350 \text{ MPa}$ ,  $m_a = 400 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $d_f = 0.8 \text{ mm}$

Další čtyři signály FFT spekter pro jednotlivé rychlosti řezu jsou na obrázku Obr. 5.22 Zde si jsou podobné spektra pro první tři posuvové rychlosti ( $50 \text{ mm.min}^{-1}$ ,  $75 \text{ mm.min}^{-1}$ ,  $100 \text{ mm.min}^{-1}$ ). Signály jsou do frekvence 4kHz o nízkých hodnotách. První navýšení amplitud je patrné od 4kHz. Hodnoty amplitud postupně rostou až k hodnotě 0,002, které dosáhnou při frekvenci 5,5kHz, a pak zase postupně klesají. Na 7kHz se vrací zpět pod hodnotu 0,001. Další vrcholek se nachází na frekvenci 9,5kHz. Maximální hodnoty amplitud v tomto místě se už pro jednotlivé rychlosti liší. Pro posuv  $50 \text{ mm.min}^{-1}$  jsou maximální hodnoty 0,002. U rychlosti  $75 \text{ mm.min}^{-1}$  amplitudy dosahují 0,026 a pro rychlost  $100 \text{ mm.min}^{-1}$  dokonce 0,003. Nejvyšší rychlost vykazuje od ostatních spekter největší odchylky. V rozmezí od 0kHz do 4kHz jsou dva výraznější vrcholky amplitud. První přesahuje hodnotu 0,001 a druhý dosáhne až na 0,002. Nárůst amplitud se nachází na hranici 4kHz jako u předchozích třech rychlostí. U 5kHz dosahují nejvyšší vrcholky hodnoty 0,0025 a pak amplitudy pozvolna klesají až k frekvenci 8kHz. Na 9kHz je pět nejvyšší vrcholek amplitud. U rychlosti  $150 \text{ mm.min}^{-1}$  jsou amplitudy na této frekvenci o velikosti 0,0035.



Obr. 5.23 Porovnání FFT spekter úseku 6 vzorku A, materiálu AISI 309,  $b = 15 \text{ mm}$  při čtyřech rychlostech kde  $v_1 = 50 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $v_2 = 75 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $v_3 = 100 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $v_4 = 150 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $p = 350 \text{ MPa}$ ,  $m_a = 400 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $d_f = 0.8 \text{ mm}$

Předchozí obrázek Obr. 5.23 znázorňuje FFT spektra pro předposlední úsek a to úsek označený číslem 6. Zde už dochází k viditelnému nárůstu amplitud se zvyšující se řeznou rychlostí. U všech čtyř spekter jsou vidět dva společné nárůsty amplitud, které se nacházejí na těchto frekvencích. První je v rozsahu 4kHz až 7kHz s vrcholem pohybujícím se mezi frekvencemi 5kHz a 6kHz. Druhý dosti výrazný vrcholek je mezi 9kHz a 10kHz. Hodnoty amplitud na těchto vrcholcích se zvyšují v závislosti s rostoucí rychlostí posuvu. Pro posuv  $50 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  přesahují amplitudy 0,003 a u rychlosti  $150 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  dosahují hodnoty amplitud skoro 0,006. Na spektru od maximální posuvové rychlosti se výrazně zvýšily i hodnoty mezi 0kHz a 3kHz. V této oblasti se amplitudy přiblížily k hodnotě 0,003. Toto vzrůstání hodnot amplitud je zřejmě způsobeno mechanickým uvolněním řezané součástky.

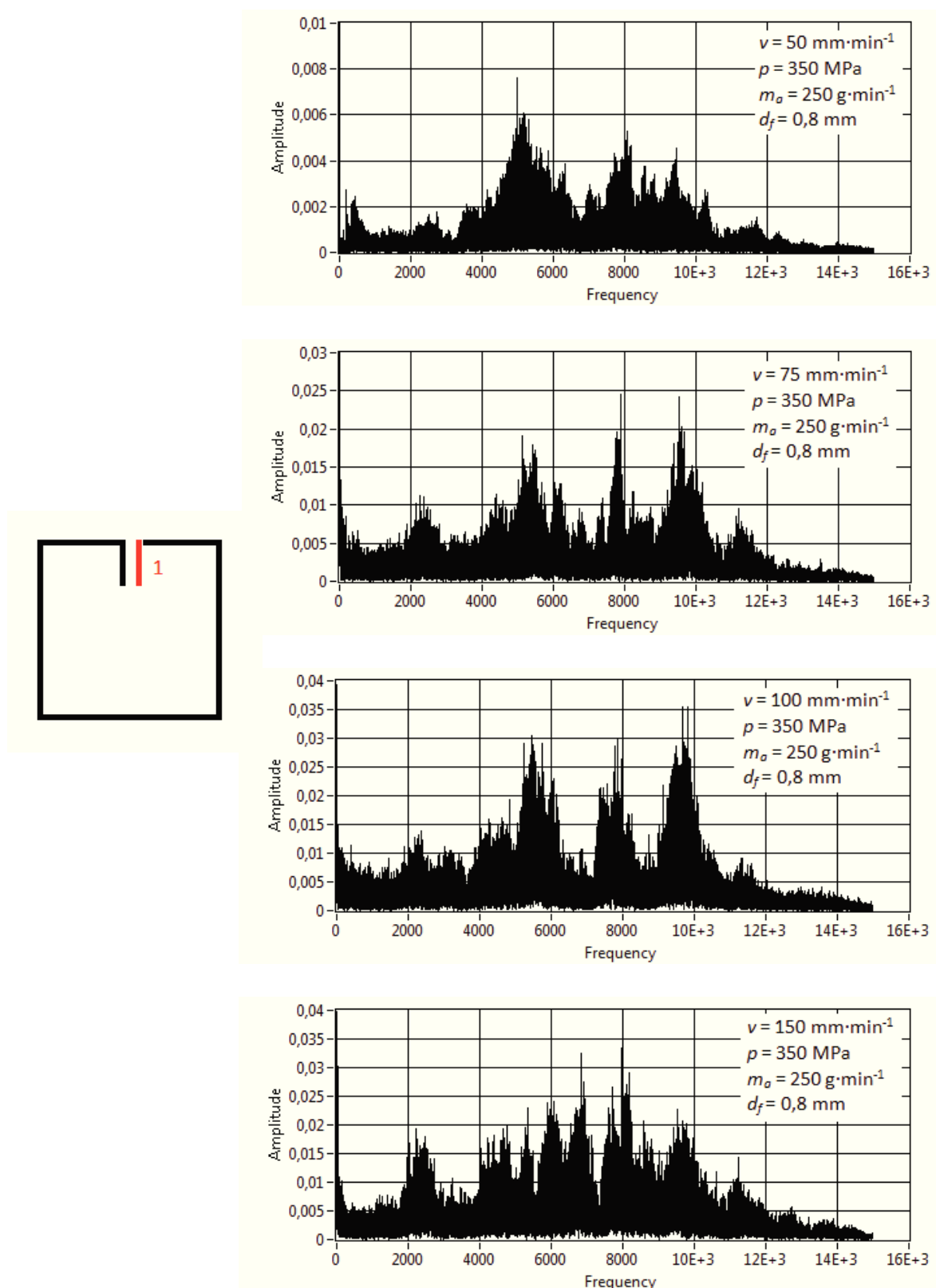


Obr. 5.24 Porovnání FFT spekter úseku 7 vzorku A, materiálu AISI 309,  $b = 15 \text{ mm}$  při čtyřech rychlostech kde  $v_1 = 50 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $v_2 = 75 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $v_3 = 100 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $v_4 = 150 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $p = 350 \text{ MPa}$ ,  $m_a = 400 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $d_f = 0.8 \text{ mm}$



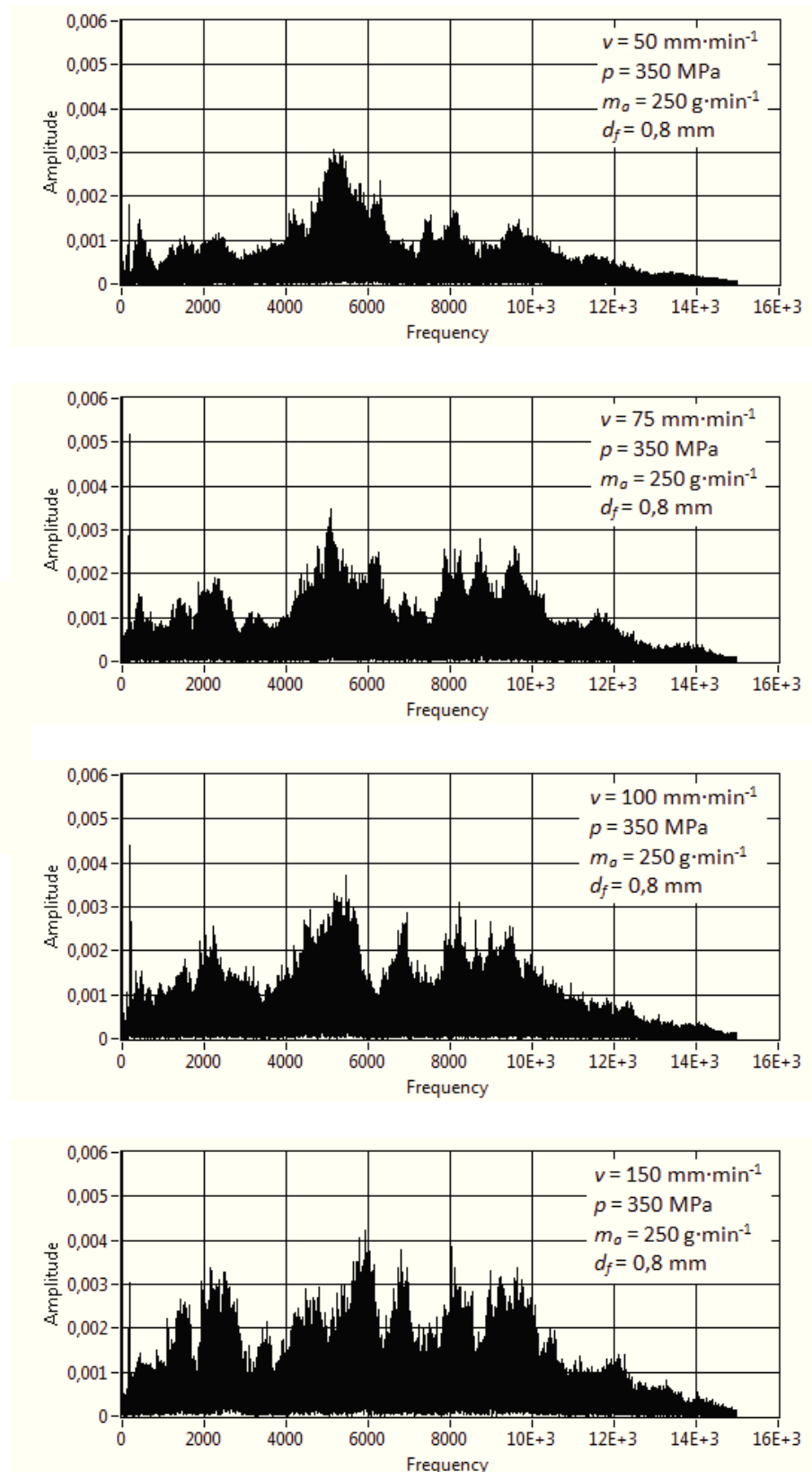
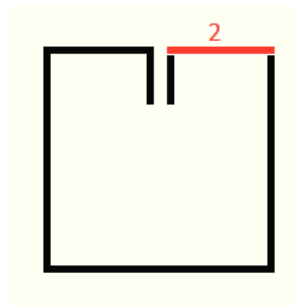
FFT spektra pro sedmý úsek sady A jsou na obrázku Obr. 5.24. Amplitudy zde dále rostou. Amplitudy se u rychlosti  $50 \text{ mm.min}^{-1}$  na frekvenčním rozsahu 0 až 4kHz pohybují pod 0,002, pouze ojediněle se hodnota amplitud vyšplhá k číslu 0,003. Nejvyšší hodnoty se objevují na vrcholku mezi frekvencemi 4kHz a 7kHz. Amplitudy zde dosahují 0,006. Od tohoto maxima směrem k frekvenci 7kHz hodnoty klesají zpět pod 0,002. Jsou zde další dva vrcholky amplitud dosahující hodnoty 0,004 na frekvenci 8kHz a 9,5kHz. Spektrum pro rychlost  $75 \text{ mm.min}^{-1}$  je velmi podobné se spektrem pro  $50 \text{ mm.min}^{-1}$ . Změnila se zde prakticky jen poloha maximálních amplitud. Oproti rychlosti  $50 \text{ mm.min}^{-1}$ , kde je maximum na vrcholku v rozsahu frekvencí 4kHz a 7kHz, je amplituda s maximální velikostí na frekvenci 9,5kHz. Dosahuje hodnoty 0,007. Rychlost  $150 \text{ mm.min}^{-1}$  je rovněž podobná s předchozíma dvěma případy. Nárůst amplitud se nachází na stejných frekvencích ale je trochu větší. Na prvním vrcholku amplitudy dosahují 0,008 a na druhém hodnoty 0,001. Nejvíce od výše popsanych rychlostí odlišuje spektrum pro rychlost  $100 \text{ mm.min}^{-1}$ . Hodnoty amplitud jsou daleko vyšší. Na frekvenci 0 až 4kHz se amplitudy pohybují okolo hodnot 0,005 s dvěma vrcholky dosahující až na 0,01. Za 4kHz je vidět nárůst amplitud na hodnotu 0,015 a chvilkový pokles. Od 5kHz se objevují dvě výrazné navýšení amplitud. Na rozmezí od 5kHz do 6,3kHz amplitudy rostou až k hodnotě 0,03. Na druhém vrcholku, který je na frekvenci 9,5kHz amplitudy dosahují stejných hodnot.

## 5.2.2. Analýza FFT spekter sady vzorků B



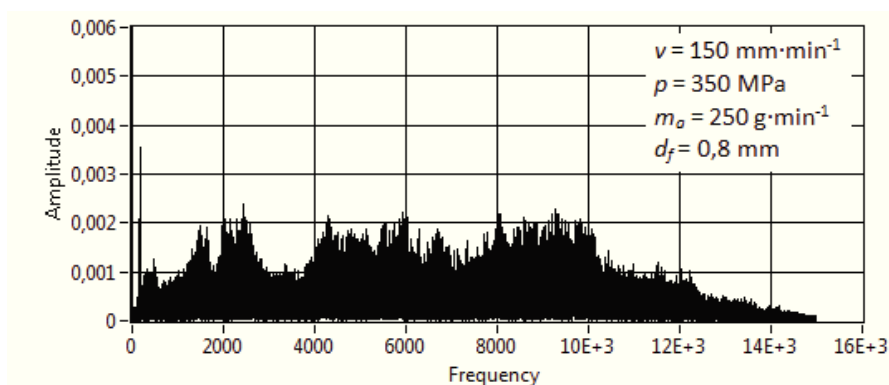
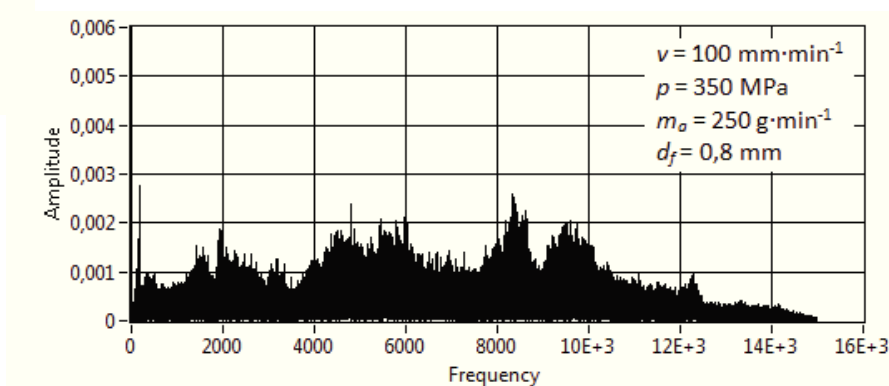
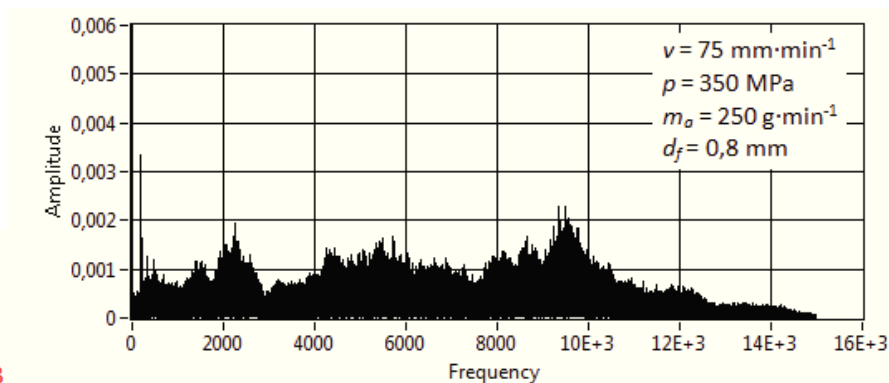
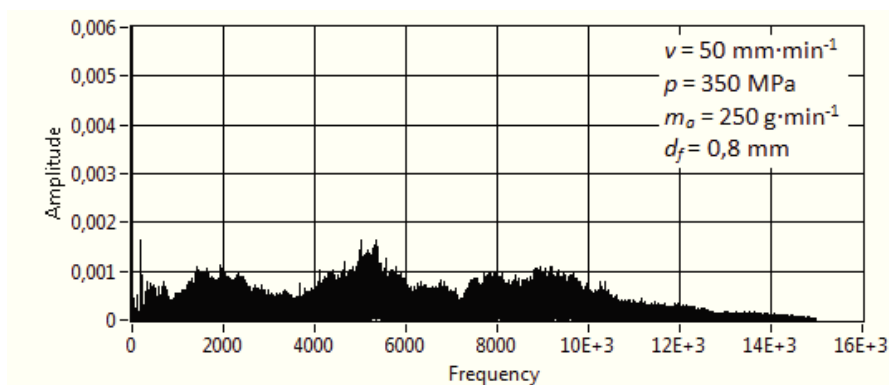
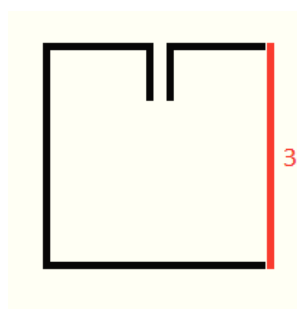
Obr. 5.25 Porovnání FFT spekter úseku 1 vzorku B, materiálu AISI 309,  $b = 15$  mm při čtyřech rychlostech kde  $v_1 = 50$  mm·min<sup>-1</sup>,  $v_2 = 75$  mm·min<sup>-1</sup>,  $v_3 = 100$  mm·min<sup>-1</sup>,  $v_4 = 150$  mm·min<sup>-1</sup>,  $p = 350$  MPa,  $m_a = 250$  g·min<sup>-1</sup>,  $d_f = 0.8$  mm

Na obrázku Obr. 5.25 jsou spektra pro první úsek sady B. Rychlost  $50 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  vykazuje amplitudy od 0 kHz do 3,2kHz okolo hodnoty 0,001 s jedním vrcholem na frekvenci 500Hz přesahujícím 0,002. Na rozsahu frekvencí 4kHz až 7kHz je výrazný nárůst amplitud s vrcholem o hodnotě 0,006. Tento vrchol se nachází na frekvenci 5kHz. Druhý nárůst je patrný v rozmezí 7kHz a 10,5kHz. Na tomto nárůstu amplitud je více vrcholů. Ten nejvyšší má hodnotu 0,005 a je na frekvenci 8kHz. Rychlosti  $75 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  a  $100 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  mají stejnou charakteristiku amplitud se třemi výraznými nárůsty hodnot. Tyto tři nárůsty jsou lépe viditelné u FFT spektra pro rychlost posuvu  $100 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ . Amplitudy na nulové frekvenci začínají na hodnotě 0,015 a rychle klesají k 0,005 s mírným nárůstem za frekvencí 2kHz. Poloha prvního výrazného nárůstu amplitud se nachází mezi 4kHz a 7kHz. U rychlosti  $75 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  dosahují amplitudy hodnoty 0,017 a u rychlosti posuvu  $100 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  mají amplitudy hodnotu 0,03. Okolo Frekvence 8kHz je druhý výrazný nárůst amplitud. Pro rychlost  $75 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  mají hodnotu 0,025 a u rychlosti  $100 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  ukazuje spektrum amplitudy dosahující 0,03. Třetí má velikost amplitudy téměř 0,025 u posuvu  $75 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  a 0,035 u posuvu  $100 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ . Tento vrchol se u obou těchto řezných rychlostí nachází na frekvenci 9,5kHz. U poslední řezné rychlosti začíná amplituda na 0,03 a s rostoucí frekvencí prudce klesá k hodnotě 0,005. Amplituda se zvýší na rozsahu frekvence 2kHz a 3kHz na hodnotu 0,019 a opět klesá. Od 4kHz amplitudy s prudkými propady rostou až na frekvenci 8kHz dosáhnou maxima 0,033. Poté je vidět pokles amplitud. Na 12kHz klesají až pod hodnotu 0,005.



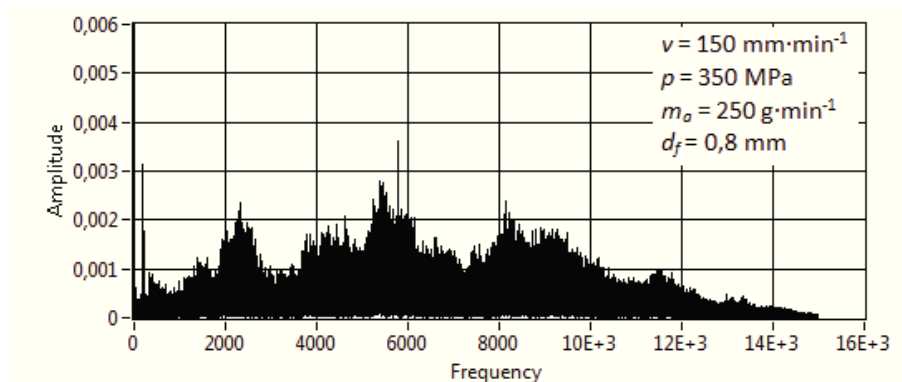
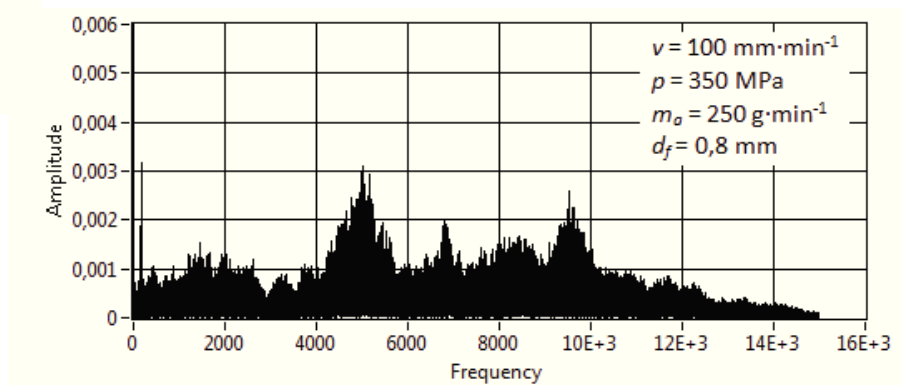
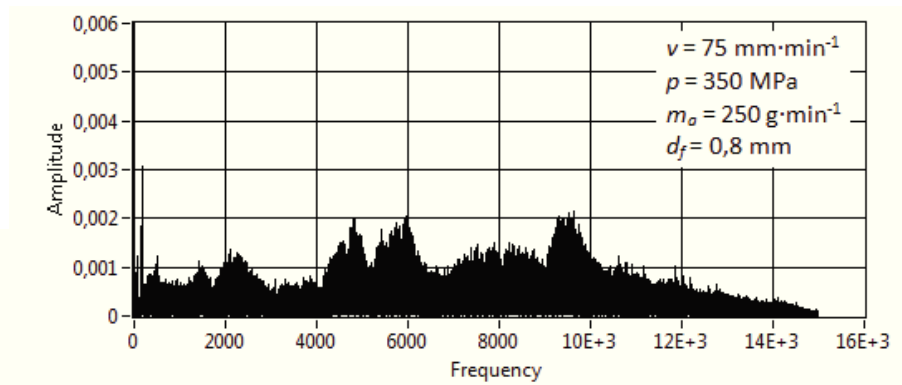
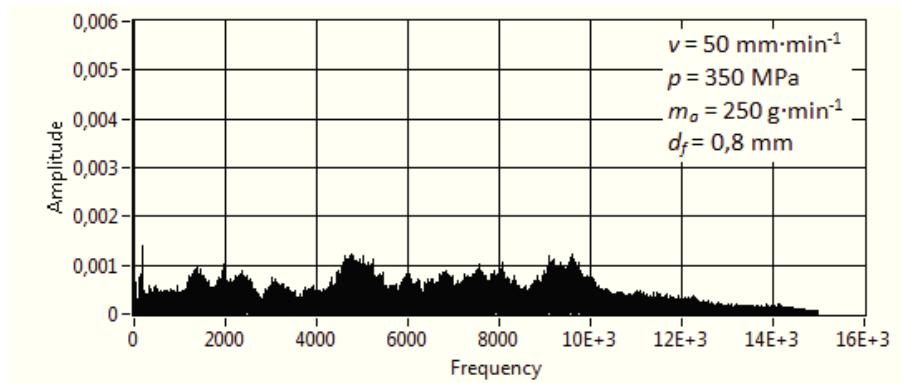
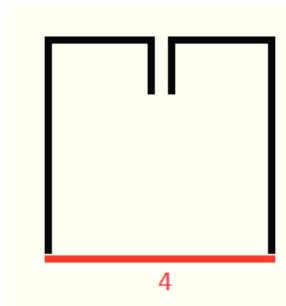
Obr. 5.26 Porovnání FFT spekter úseku 2 vzorku B, materiálu AISI 309,  $b = 15 \text{ mm}$  při čtyřech rychlostech kde  $v_1 = 50 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $v_2 = 75 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $v_3 = 100 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $v_4 = 150 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $p = 350 \text{ MPa}$ ,  $m_a = 250 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $d_f = 0.8 \text{ mm}$

Na Obr. 5.26 jsou FFT spektra čtyř rychlostí posuvu vzorků ze sady B na druhém úseku. U prvních třech posuvových rychlostí je FFT spektrum velmi podobné. Amplitudy mají přibližně stejné maximální hodnoty na stejné frekvenci. Tato hodnota se pohybuje okolo 0,003 na frekvenci 5kHz. Je vidět nárůst amplitud s rostoucí řeznou rychlostí na počátečním rozsahu 0kHz až 3kHz a na rozsahu 6,5kHz až 11kHz. Zejména na druhém rozsahu je nárůst amplitud dobře viditelný. Nejvyšší rychlost posuvu vykazuje největší hodnoty amplitud. Od počátku až po 2,5kHz amplitudy narůstají na 0,0032 a poté padají k hodnotám 0,001. Od frekvence 3,5kHz jsou vidět 4 vrcholky amplitud, z nichž nejvyšší je na frekvenci 6kHz a má hodnotu 0,004. Další tři jsou na frekvencích 6,5kHz, 8kHz a okolo 9,5kHz. Od frekvence 10kHz amplitudy postupně klesají.



Obr. 5.27 Porovnání FFT spekter úseku 3 vzorku B, materiálu AISI 309,  $b = 15$  mm při čtyřech rychlostech kde  $v_1 = 50$  mm·min<sup>-1</sup>,  $v_2 = 75$  mm·min<sup>-1</sup>,  $v_3 = 100$  mm·min<sup>-1</sup>,  $v_4 = 150$  mm·min<sup>-1</sup>,  $p = 350$  MPa,  $m_a = 250$  g·min<sup>-1</sup>,  $d_f = 0.8$  mm

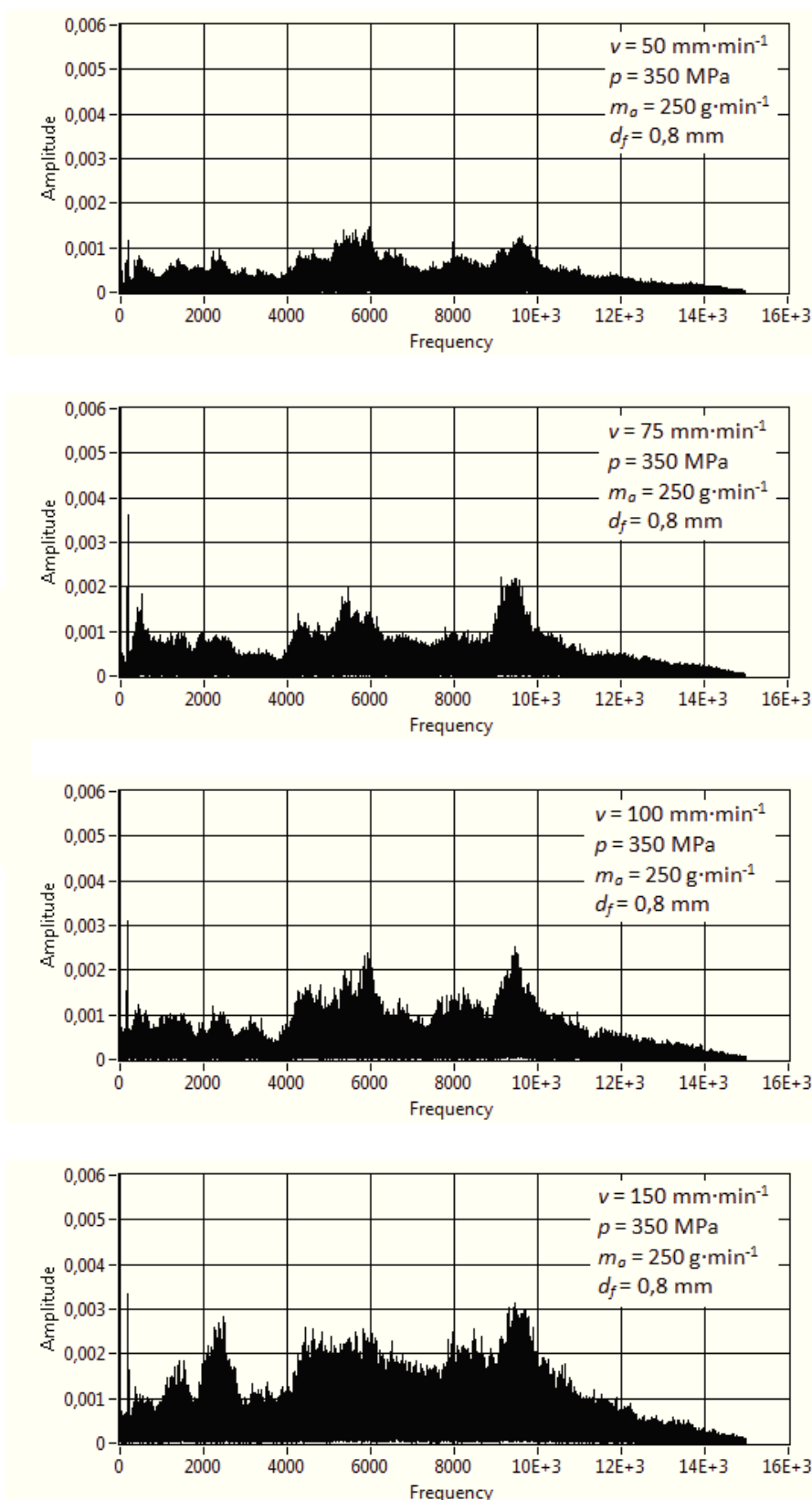
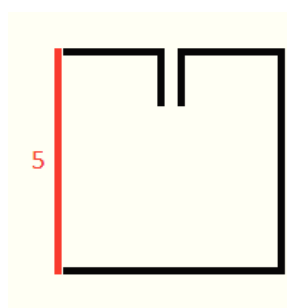
Na obrázku Obr. 5.27 jsou FFT spektra pro rychlosti od  $50 \text{ mm.min}^{-1}$  po  $150 \text{ mm.min}^{-1}$ . Tyto spektra jsou pro třetí úsek vzorků ze sady B. U první rychlosti  $50 \text{ mm.min}^{-1}$  jsou amplitudy pod hodnotou 0,001. Na frekvencích mezi 1kHz a 2,5kHz se hodnoty pohybují okolo 0,001. Amplitudy o stejných hodnotách najdeme na frekvencích od 7,5kHz po 10kHz. Je zde jeden výraznější vrcholek amplitud v rozsahu frekvencí 4kHz až 6kHz. Amplitudy na tom to místě dosahují velikosti 0,0015. S rostoucí řeznou rychlostí i v tomto případě se amplitudy zvětšují. U rychlosti  $75 \text{ mm.min}^{-1}$  amplitudy přesahují hodnotu 0,001 na více místech než v předchozím případě. Konkrétně mezi 2kHz a 3kHz, v rozsahu 4kHz a 7,5kHz a v posledním rozmezí 7,8kHz a 10,5kHz. V prvním jmenovaném rozsahu amplitudy šplhají k hodnotě 0,002. V třetím rozsahu jsou amplitudy o maximální hodnotě 0,002 na frekvenci 9,5kHz. Při rychlosti  $100 \text{ mm.min}^{-1}$  jsou amplitudy velmi podobné jako u rychlosti  $75 \text{ mm.min}^{-1}$ . Amplitudy mají trochu vyšší hodnoty a nejvyšší hodnoty se nacházejí na frekvenci 8,5kHz. Dosahují velikosti 0,0025. U poslední řezné rychlosti amplitudy rostou k hodnotě 0,002. Velikost je až do frekvence 10kHz téměř stejná, kromě rozsahu 2,5kHz až 4kHz kde amplitudy klesly k 0,001.



Obr. 5.28 Porovnání FFT spekter úseku 4 vzorku B, materiálu AISI 309,  $b = 15$  mm při čtyřech rychlostech kde  $v_1 = 50$  mm.min<sup>-1</sup>,  $v_2 = 75$  mm.min<sup>-1</sup>,  $v_3 = 100$  mm.min<sup>-1</sup>,  $v_4 = 150$  mm.min<sup>-1</sup>,  $p = 350$  MPa,  $m_a = 250$  g.min<sup>-1</sup>,  $d_f = 0.8$  mm

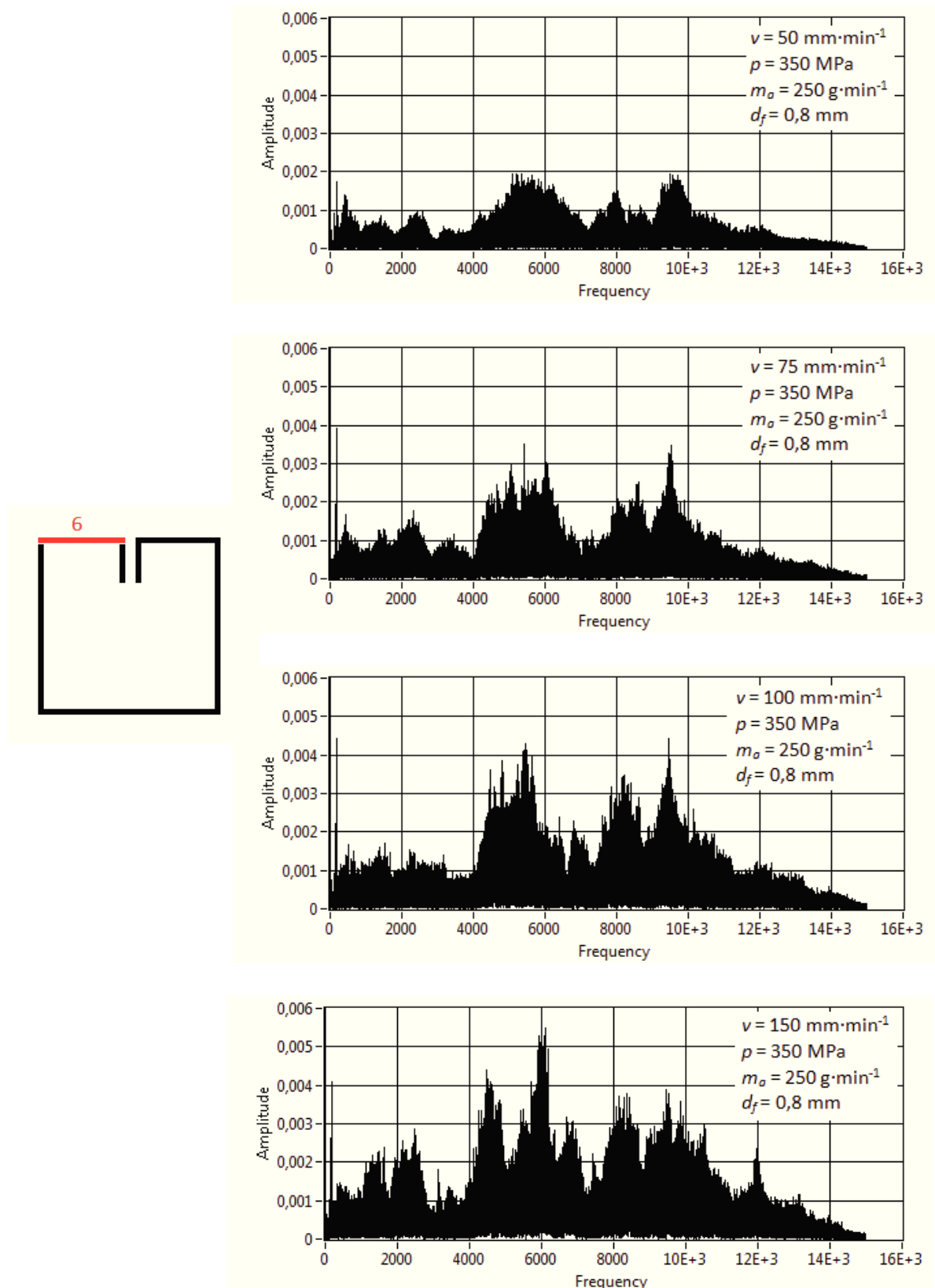


Na obrázku Obr. 5.28 jsou FFT spektra pro čtvrtý úsek se sady vzorků B. U rychlosti  $50 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  mají amplitudy nízké hodnoty. Pouze ve dvou vrcholcích, které se nacházejí okolo frekvencí 5kHz a 9,5kHz hodnota amplitud přesáhne 0,001. Druhá posuvová rychlost má amplitudy FFT spektra trochu vyšší se třemi výraznějšími nárůsty hodnot. První dva jsou v rozsahu frekvencí 4kHz až 6kHz a třetí se nachází mezi 9kHz až 10kHz. Všechny tři vrcholky amplitud mají velikost 0,002. Amplitudy u třetí rychlosti  $100 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  se opět mírně zvýšily. I přes to jsou však podobné jako u rychlosti  $75 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ . Největší změna je v rozsahu frekvencí 4kHz až 6kHz kde je jen jeden vrcholek a dosahuje hodnoty 0,003. Posuvová rychlost  $150 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  má tři výraznější vrcholky amplitud. Okolo frekvence 2,5 dosahují amplitudy velikosti 0,002. Další nárůst amplitud najdeme v rozmezí 3,5kHz až 7kHz s vrcholem u 5,5kHz. Tento vrcholek má nejvyšší hodnotu z celého spektra a přibližuje se k 0,003. Poslední nárůst hodnot je patrný od 7.5kHz po 10kHz.



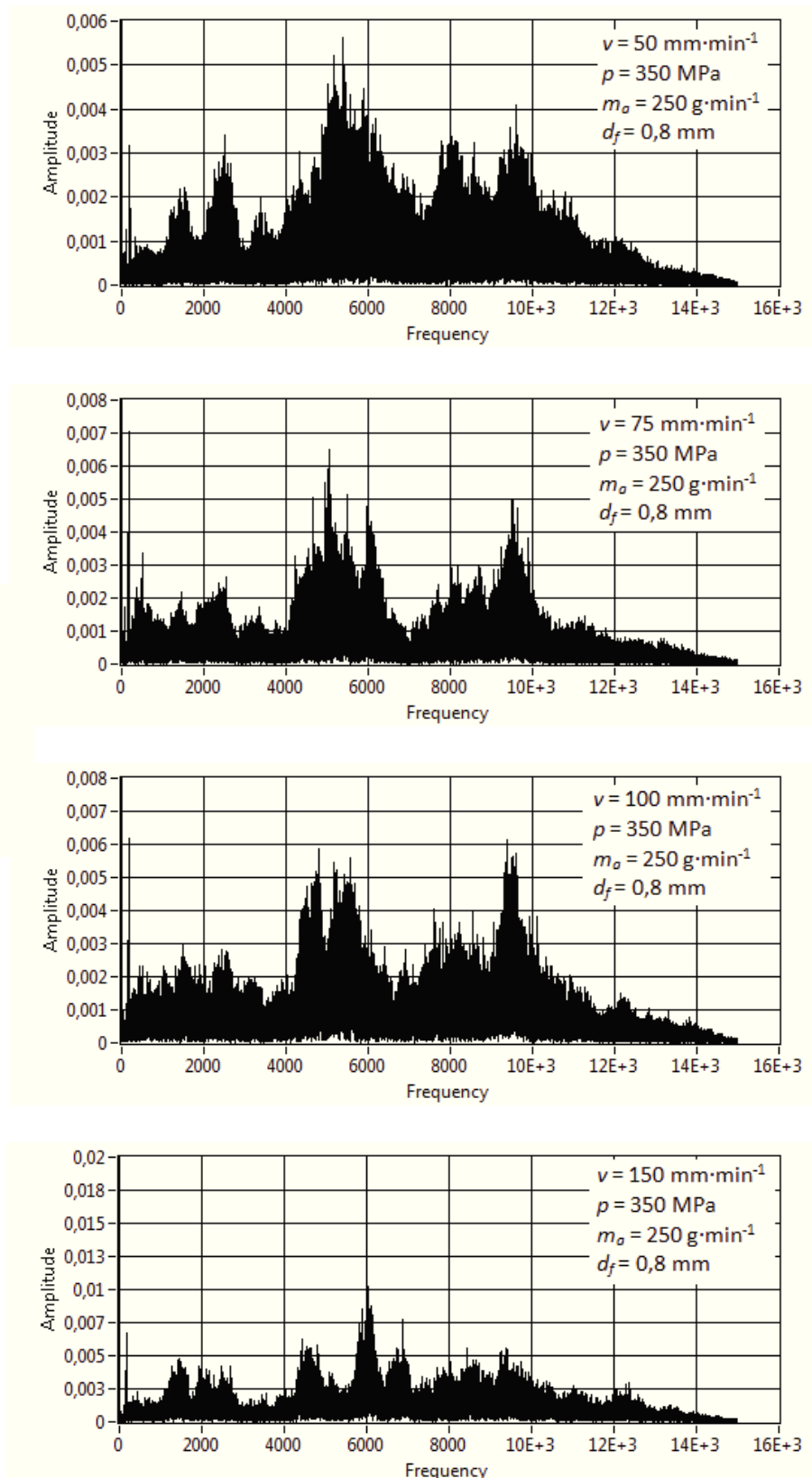
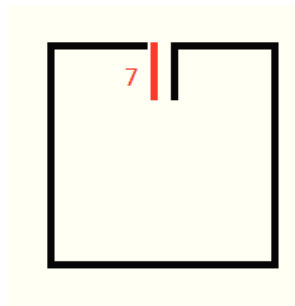
Obr. 5.29 Porovnání FFT spekter úseku 5 vzorku B, materiálu AISI 309,  $b = 15 \text{ mm}$  při čtyřech rychlostech kde  $v_1 = 50 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $v_2 = 75 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $v_3 = 100 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $v_4 = 150 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $p = 350 \text{ MPa}$ ,  $m_a = 250 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $d_f = 0.8 \text{ mm}$

Obrázek Obr. 5.29 zobrazuje čtyři FFT spektra pro čtyři posuvové rychlosti na pátém úseku řezaných vzorků sady B. Spektra pro první tři posuvové rychlosti si jsou dosti podobná. Opět se zvyšující se rychlostí řezu se zvyšují amplitudy FFT spekter. Spektra mají dva výraznější nárůsty amplitud. Jeden v oblasti mezi 4kHz a 6,5kHz. U nejmenší řezné rychlosti je zde hodnota amplitud 0,0015 a u třetí rychlosti 100 mm.min<sup>-1</sup> amplitudy vzrostou na 0,0025. Druhý vrcholek se nachází okolo frekvence 9,5kHz a rovněž se hodnoty amplitud s rostoucí řeznou rychlostí zvětšují. Pro rychlost 50 mm.min<sup>-1</sup> přesahují amplitudy 0,001 a u rychlosti 100 mm.min<sup>-1</sup> už dosahují hodnoty 0,0025. Poslední řezná rychlost se od ostatních mírně liší. První nárůst amplitud je už na frekvenci 2,5kHz a dosahuje téměř hodnoty 0,003. Další nárůst je v oblasti frekvencí od 4kHz po 11kHz. Velikost amplitud je v této oblasti je 0,0025 pouze okolo frekvence 7,5kHz amplitudy klesají pod 0,002. Nejvyšší vrcholek je na 9,5kHz. Amplitudy zde dosahují hodnoty 0,003.



Obr. 5.30 Porovnání FFT spekter úseku 6 vzorku B, materiálu AISI 309,  $b = 15 \text{ mm}$  při čtyřech rychlostech kde  $v_1 = 50 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $v_2 = 75 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $v_3 = 100 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $v_4 = 150 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $p = 350 \text{ MPa}$ ,  $m_a = 250 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $d_f = 0.8 \text{ mm}$

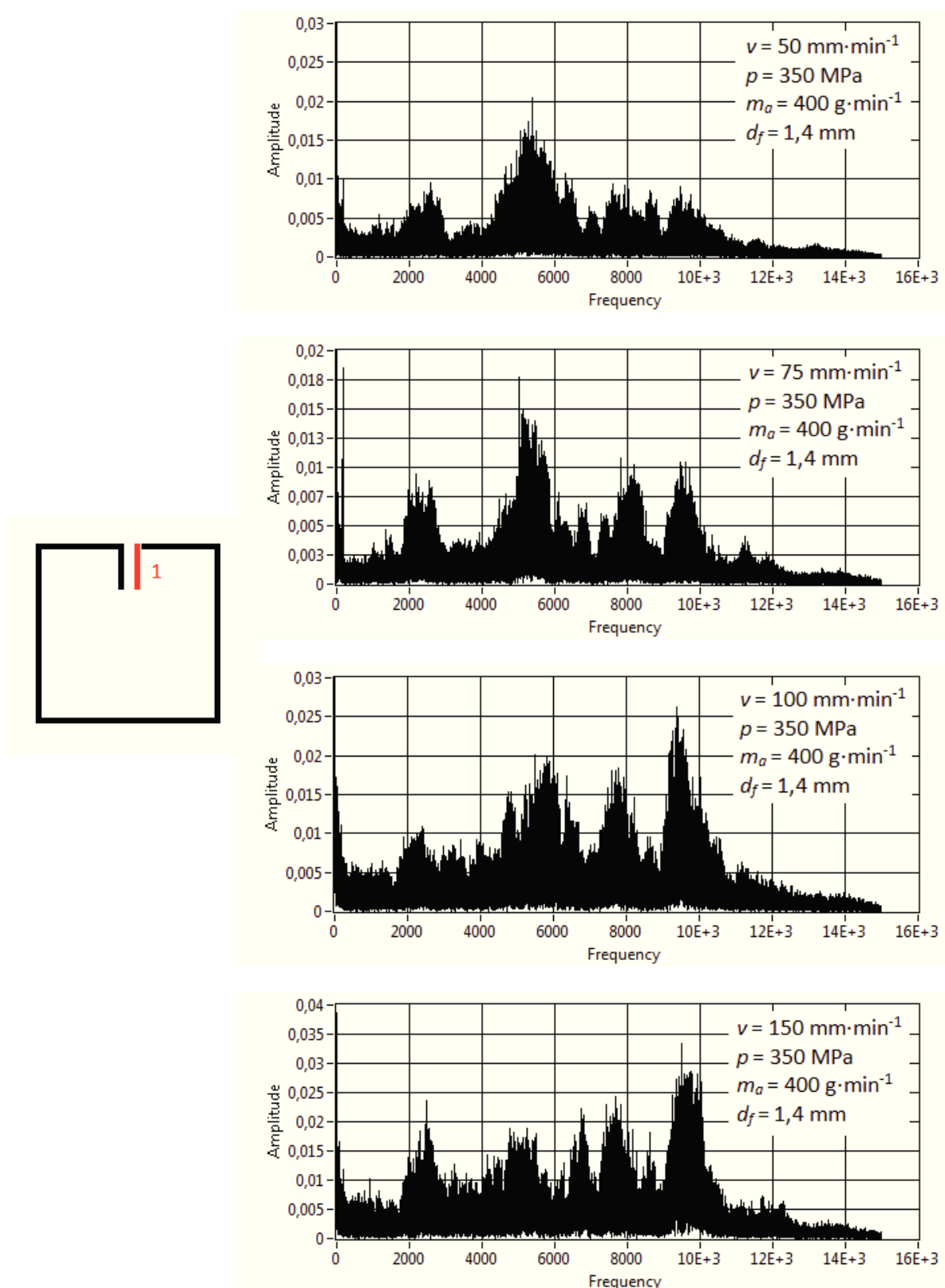
Na obrázku Obr. 5.30 jsou FFT spektra pro šestý úsek vzorků ze sady B. Amplitudy na tomto úseku výrazně rostou s posuvovou rychlostí. Takto vysoký nárůst amplitud je způsoben mechanickým uvolněním součástí. Tento efekt se projevuje také u sedmého úseku. Amplitudy FFT spekter mají pro první tři rychlosti opět přibližně stejný tvar. Jsou zde tři nárůsty amplitud, které se s rostoucím posuvem řezné hlavičky zvyrazňují. Nárůsty se objevují na těchto frekvencích: 4kHz až 7kHz, v okolí 8kHz a 9,5kHz. Nejvyšší hodnoty u rychlosti 50 mm.min<sup>-1</sup> dosahují 0,002. U třetí rychlosti už amplitudy přesahují 0,004. Okolo Frekvence 9,5kHz jsou hodnoty amplitud nejvyšší. U rychlosti 150 mm.min<sup>-1</sup> amplitudy neustále prudce rostou a klesají. Tyto vrcholky se dají popsat jako tři nárůsty amplitud ve frekvencích 1kHz až 3,kHz, 4kHz až 7kHz, 7kHz až 11kHz s prudkými propady hodnot. Nejvyšší hodnoty amplitud se nacházejí na 6kHz a přesahují hodnotu 0,005.



Obr. 5.31 Porovnání FFT spekter úseku 7 vzorku B, materiálu AISI 309,  $b = 15 \text{ mm}$  při čtyřech rychlostech kde  $v_1 = 50 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $v_2 = 75 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $v_3 = 100 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $v_4 = 150 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $p = 350 \text{ MPa}$ ,  $m_a = 250 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $d_f = 0.8 \text{ mm}$

Na obrázku Obr. 5.31. jsou zobrazeny FFT spektra pro sedmé úseky vzorků ze skupiny B. Při řezné rychlosti  $50 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  je vidět menší nárůst amplitud na frekvencích 1,5kHz a 2,5kHz. Výraznější nárůst je mezi 4kHz a 7kHz, kde nejvyšší hodnoty amplitud přesahují 0,005. Další dva vrcholky amplitud se nacházejí na oblasti frekvencí mezi 7kHz a 10kHz. Následující dvě spektra pro rychlosti  $75 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  a  $100 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  jsou tvarově podobná. Hodnota amplitud se u těchto dvou spekter s řeznou rychlostí zvětšuje. Jsou zde dva dosti výrazné nárůsty amplitud. První v rozmezí 4kHz až 7kHz a druhý od 7kHz po 11kHz. V prvním frekvenčním rozsahu je hodnota amplitud pro rychlost  $75 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  většinou pod 0,004 ale u 5kHz amplituda vyšplhala až přes 6 kHz. U rychlosti  $100 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  dosahují amplitudy hodnoty 0,005. Ve druhém nárůstu amplitud dosahují amplitudy hodnoty 0,005 pro rychlost  $75 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ , a 0,006 pro rychlost  $100 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ . Řezná rychlost  $150 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  vykazuje nejvyšší amplitudy. Je zde 5 výraznějších nárůstů amplitud. Objevují se okolo frekvencí 1,5kHz, 2,5kHz, 4,5kHz, 6kHz a 6,5kHz. Nejvyšších hodnot dosahují amplitudy na frekvenci 6kHz. Amplitudy v tomto místě dosáhnou až na hodnotu 0,01. Poslední zvýšení amplitud k hodnotám 0,005 je na rozmezí frekvencí 7,5 až 10kHz.

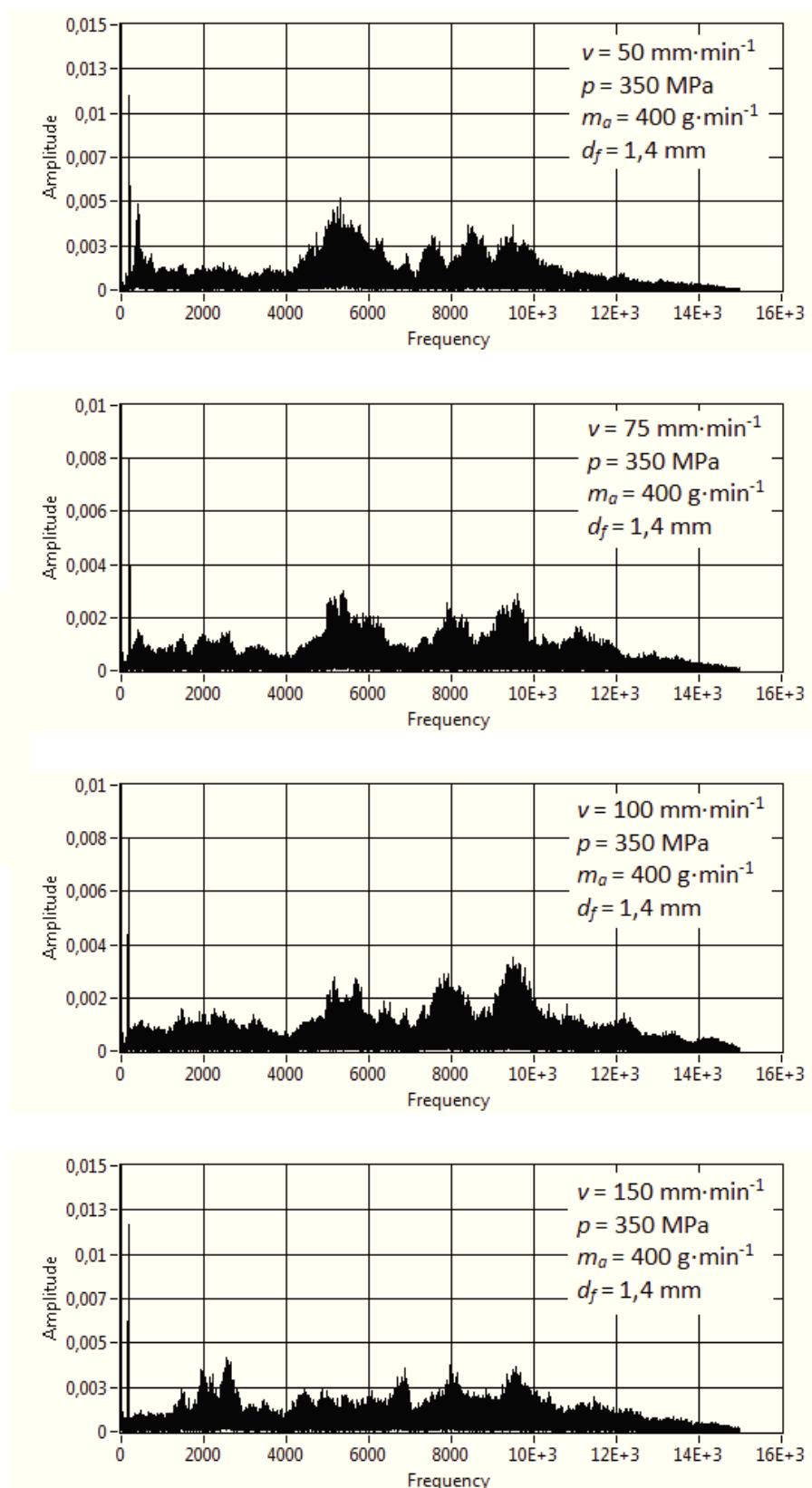
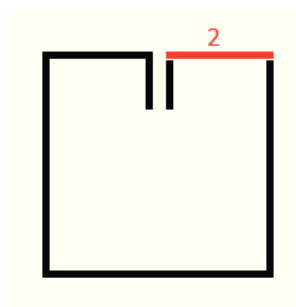
## 5.2.3. Analýza FFT spekter sady vzorků C



Obr. 5.32 Porovnání FFT spekter úseku 1 vzorku C, materiálu AISI 309,  $b = 15$  mm při čtyřech rychlostech kde  $v_1 = 50$  mm·min<sup>-1</sup>,  $v_2 = 75$  mm·min<sup>-1</sup>,  $v_3 = 100$  mm·min<sup>-1</sup>,  $v_4 = 150$  mm·min<sup>-1</sup>,  $p = 350$  MPa,  $m_a = 400$  g·min<sup>-1</sup>,  $d_f = 1,4$  mm

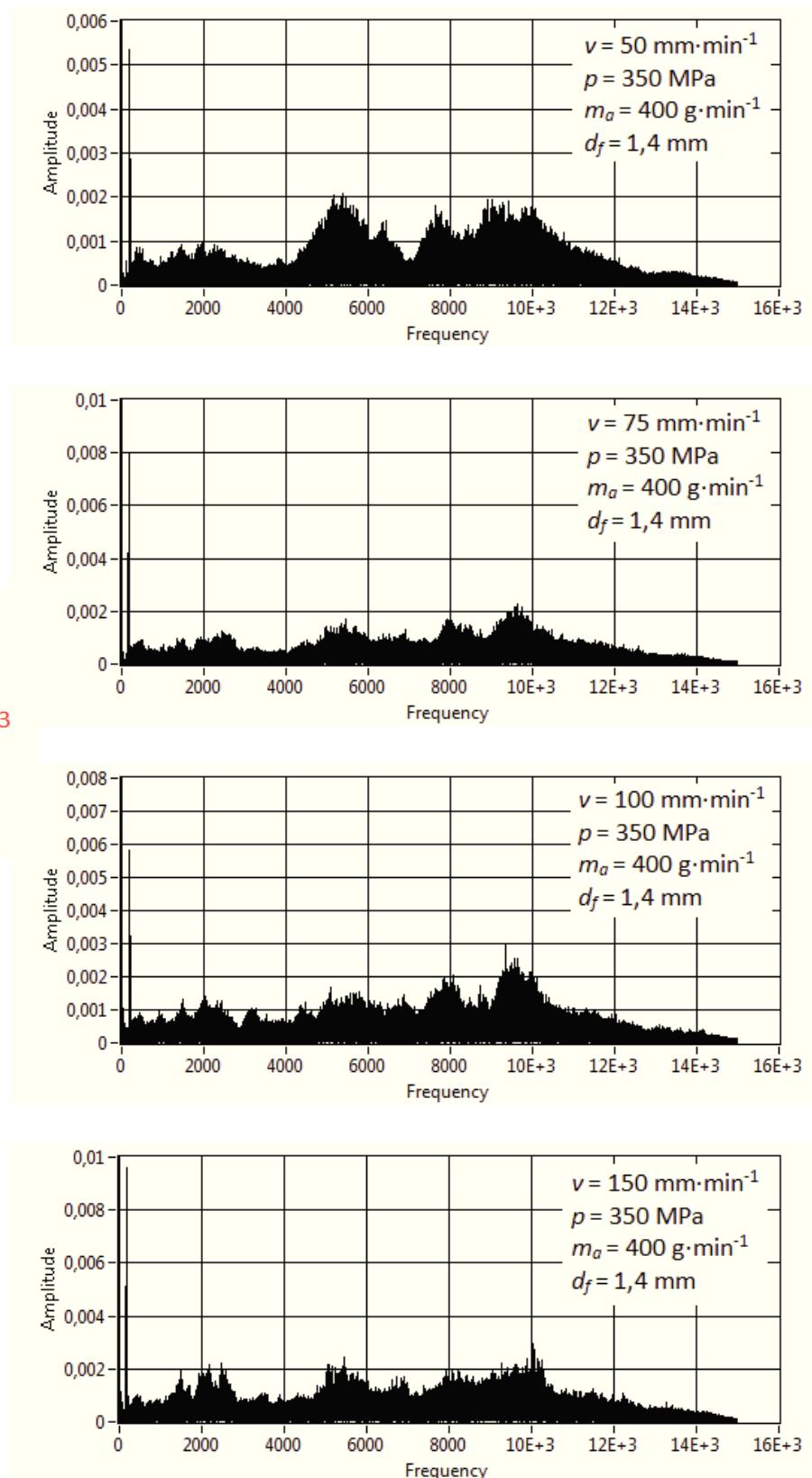
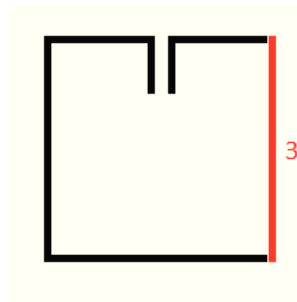


Na obrázku Obr. 5.32 jsou vidět FFT spektra prvních úseků ze sady vzorků C. FFR signály prvního úseku při všech čtyřech rychlostech si jsou navzájem podobné. Všechny signály mají hned od nulové frekvence zvýšené hodnoty amplitud. Dále se objevují 4 výrazné nárůsty amplitud. Všechny přibližně na stejných místech. V tomto případě však nelze říct, že se hodnoty amplitud společně s řeznou rychlostí zvyšují. U rychlosti  $75 \text{ mm.min}^{-1}$  se objevují amplitudy o nižších hodnotách, než při rychlosti  $50 \text{ mm.min}^{-1}$ . Následující dvě řezné rychlosti trend zvyšování hodnot amplitud v závislosti na řezné rychlosti dodržují. Zvýšení amplitud se objevuje na těchto frekvencích: 2kHz až 3kHz, 4kHz až 7kHz, 7kHz až 9kHz a poslední od 9kHz po 11kHz. U rychlosti  $50 \text{ mm.min}^{-1}$  se maximální hodnoty amplitud objevují v druhém popsaném frekvenčním rozsahu a dosahuje hodnot 0,002. Zbylé tři vrcholy se přibližují k 0,001. Amplitudy na nulové frekvenci začínají na hodnotě 0,001, ale poté prudce klesají. U rychlosti  $75 \text{ mm.min}^{-1}$  hodnota amplitud začíná na 0,007. Objevuje se zde amplituda okolo 100Hz která ukazuje hodnotu přes 0,018. Tyto výrazný jednorázový výkyv se objevuje u celé sady vzorků C i D. To může být způsobeno chybou při měření hodnot. Hodnoty nárůstu amplitud dosahují u třech vrcholů hodnot 0,001. Nejvyšší amplitudy jsou také na druhém již dříve popsaném frekvenčním rozsahu, a dosahuje hodnoty 0,018. Při rychlosti  $100 \text{ mm.min}^{-1}$  jsou výraznější pouze tři vrcholy amplitud. Na prvním rozsahu frekvencí dosahuje vrcholek hodnoty jen 0,001 a touto hodnotou není zvlášť výrazný. Nejvyšších hodnot dosahují amplitudy až na posledním rozsahu frekvencí tj. 9kHz až 11kHz. Objevuje se zde amplituda přesahující hodnotu 0,025. Tato hodnota se nachází v daném rozsahu na frekvenci 9,5kHz. Amplituda u rychlosti  $100 \text{ mm.min}^{-1}$  začíná na hodnotě 0,017 a poté prudce klesá jako v předchozích případech. U rychlosti posuvu  $150 \text{ mm.min}^{-1}$  amplitudy na nulové frekvenci také začínají na hodnotách okolo 0,017. Nárůsty amplitud jsou podobné jako u předchozích rychlostí ale změnil se frekvence, na kterých se tyto vrcholy nacházejí. Maximální amplitudy jsou na frekvenci 9,5kHz přesahují hodnotu 0,03. Zbylé vrcholky se pohybují okolo hodnoty 0,02 popřípadě se přibližují číslu 0,025.



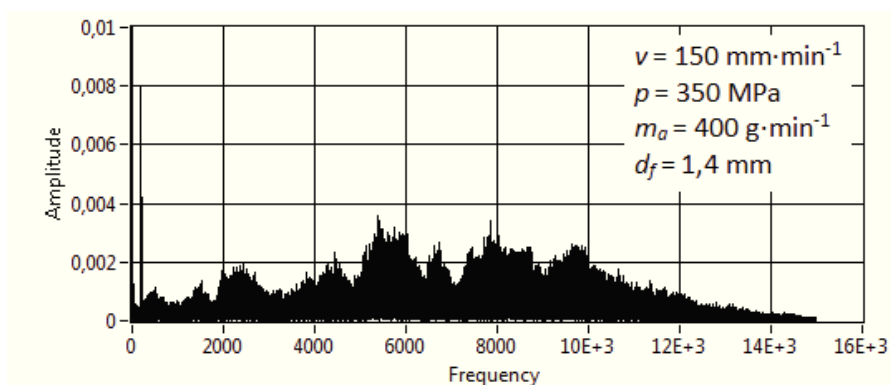
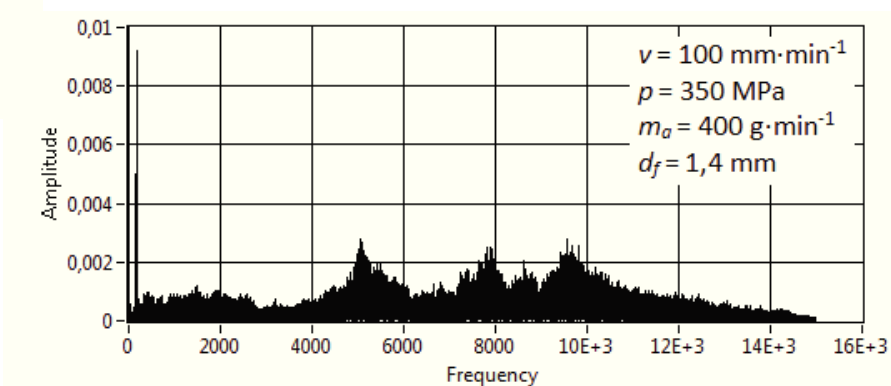
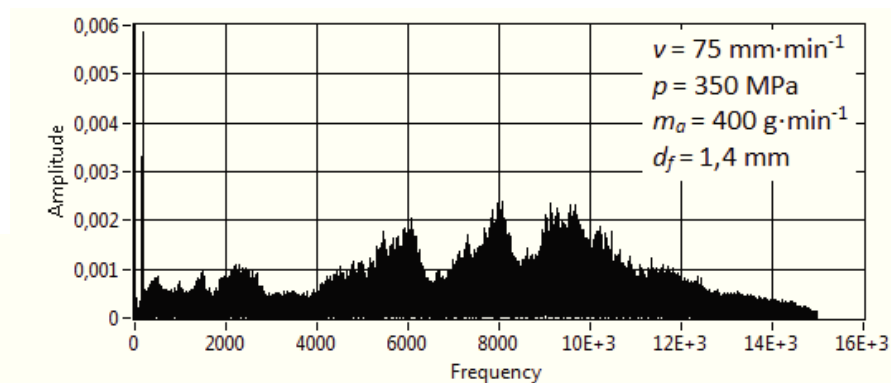
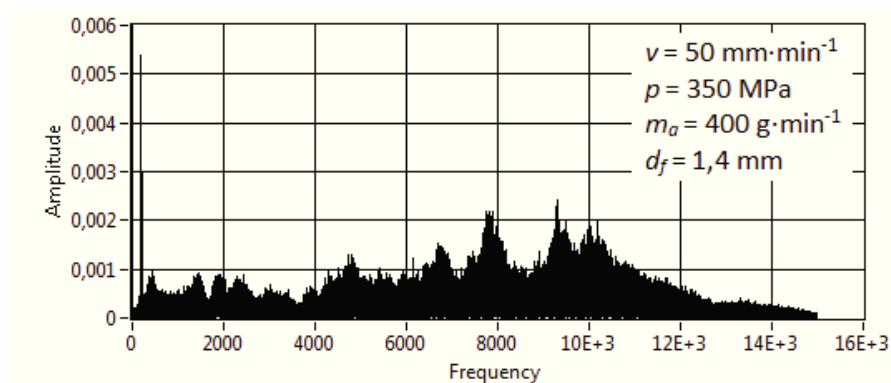
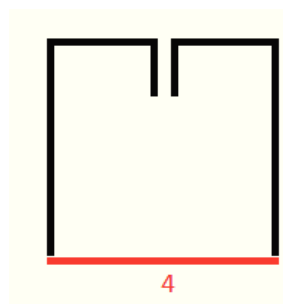
Obr. 5.33 Porovnání FFT spekter úseku 2 vzorku C, materiálu AISI 309,  $b = 15 \text{ mm}$  při čtyřech rychlostech kde  $v_1 = 50 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $v_2 = 75 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $v_3 = 100 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $v_4 = 150 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $p = 350 \text{ MPa}$ ,  $m_a = 400 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $d_f = 1.4 \text{ mm}$

Obrázek Obr. 5.33 zobrazuje FFT spektra pro druhý řezaný úsek na vzorcích ze sady C. U rychlosti posuvu řezné hlavy  $50 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  je viditelný první nárůst amplitud již na frekvenci 500Hz. Amplitudy se zde přibližují k hranici 0,005 a následně prudce hodnoty klesají. Nejvýraznější nárůsty hodnot jsou patrné na frekvencích mezi 4kHz a 6,5kHz, kde dosahují amplitudy nejvyšších hodnot 0,005, a mezi 7kHz a 10kHz. Zde se objevují celkem tři vrcholky amplitud blíží se k hodnotě 0,004. U rychlosti  $75 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  jsou patrné tři navýšení amplitud. Hodnoty se u všech pohybují okolo 0,003. Tyto tři vrcholy jsou na frekvencích 5kHz, 8kHz a 9,5kHz. Charakteristika signálu pro rychlost  $100 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  se podobá spektru pro  $75 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ . Jsou zde tři vrcholy amplitud na stejných frekvencích. Pouze na 9,5kHz se objevují amplitudy s nejvyššími hodnotami, které se blíží 0,004. U rychlosti  $150 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  jsou viditelné první tři vrcholky amplitud na frekvenčním rozsahu 1kHz až 3kHz. Nejvyšší z vrcholů se nachází před frekvencí 3kHz a má hodnotu 0,0045. Tato hodnota amplitudy je u tohoto FFT spektra pro rychlost  $150 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  nejvyšší. Další navýšení se objevují na 6,7kHz, 8kHz a 9,5kHz. Tyto navýšení se pohybují okolo hodnoty 0,004.



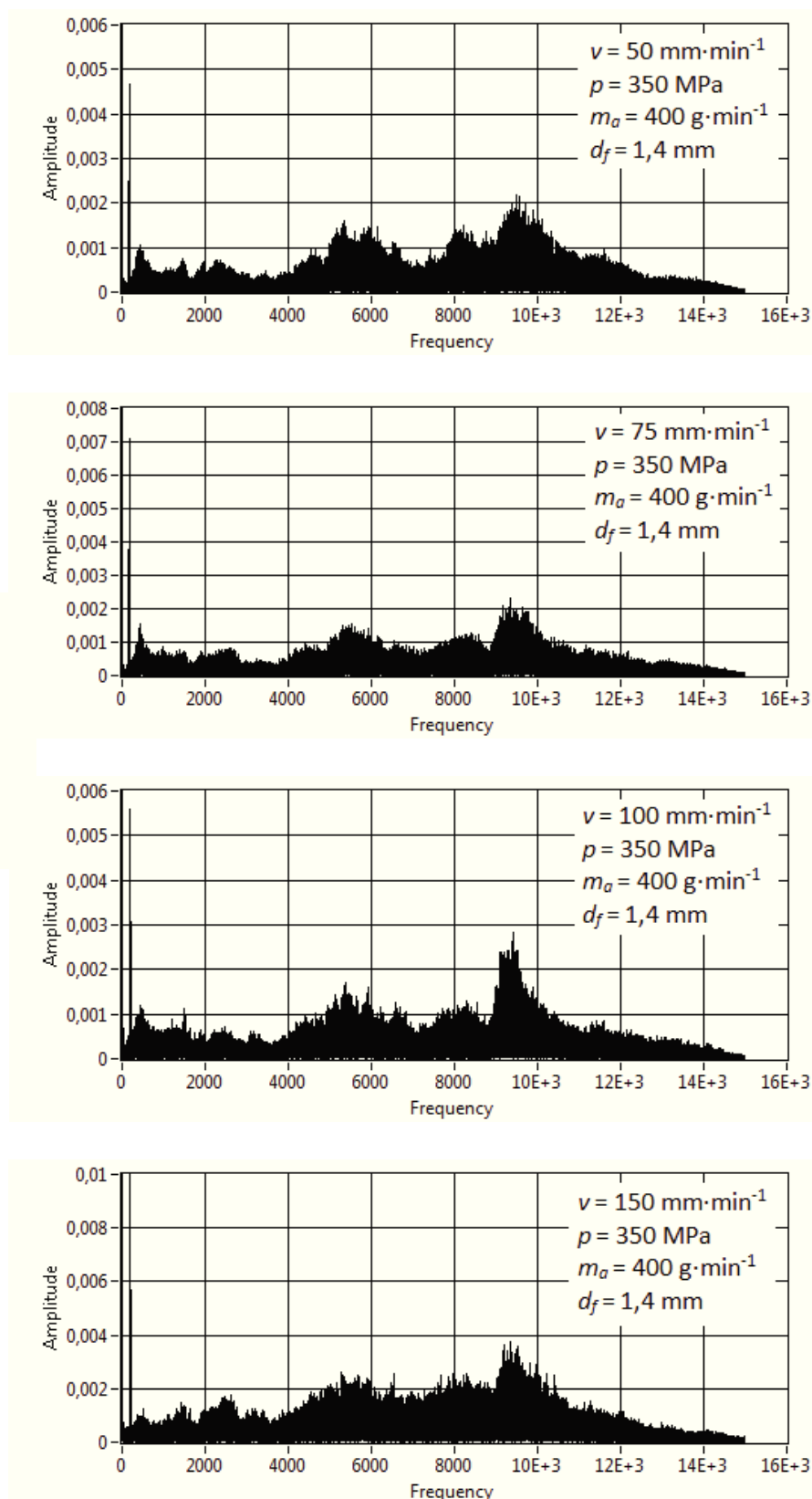
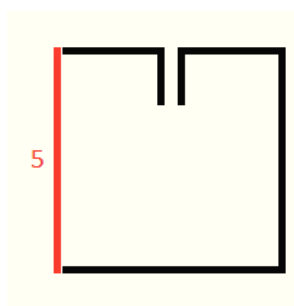
Obr. 5.34 Porovnání FFT spekter úseku 3 vzorku C, materiálu AISI 309,  $b = 15 \text{ mm}$  při čtyřech rychlostech kde  $v_1 = 50 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $v_2 = 75 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $v_3 = 100 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $v_4 = 150 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $p = 350 \text{ MPa}$ ,  $m_a = 400 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $d_f = 1,4 \text{ mm}$

Na obrázku Obr. 5.34 Jsou FFT spektra pro třetí řezaný úsek vzorků C. U prvních třech rychlostí se amplitudy navzájem podobají. Rychlost  $50 \text{ mm.min}^{-1}$  má navýšení hodnot amplitud nefrekvenčním rozsahu 4kHz až 7kHz. Druhé navýšení se dvěma vrcholky amplitud je mezi 7kHz a 11kHz. Amplitudy těchto navýšení dosahují hodnot 0,002. Následující rychlosti ( $75 \text{ mm.min}^{-1}$ ,  $100 \text{ mm.min}^{-1}$ ) mají amplitudy přibližně stejného tvaru. Hodnotu 0,002 amplitudy přesáhnou jen na frekvenci 9,5kHz. U rychlosti  $100 \text{ mm.min}^{-1}$  na této frekvenci dosahují amplitudy hodnot 0,0025. Rychlost  $150 \text{ mm.min}^{-1}$  vykazuje navýšení amplitud na těchto místech: 1kHz až 3kHz, 5kHz až 6kHz, 7kHz až 11kHz. Amplitudy v těchto rozsazích místy překročí hodnotu 0,002. Nejvyšší amplitudy se nacházejí na 10kHz a mají hodnotu 0,003.



Obr. 5.35 Porovnání FFT spekter úseku 4 vzorku C, materiálu AISI 309,  $b = 15 \text{ mm}$  při čtyřech rychlostech kde  $v_1 = 50 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $v_2 = 75 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $v_3 = 100 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $v_4 = 150 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $p = 350 \text{ MPa}$ ,  $m_a = 400 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $d_f = 1.4 \text{ mm}$

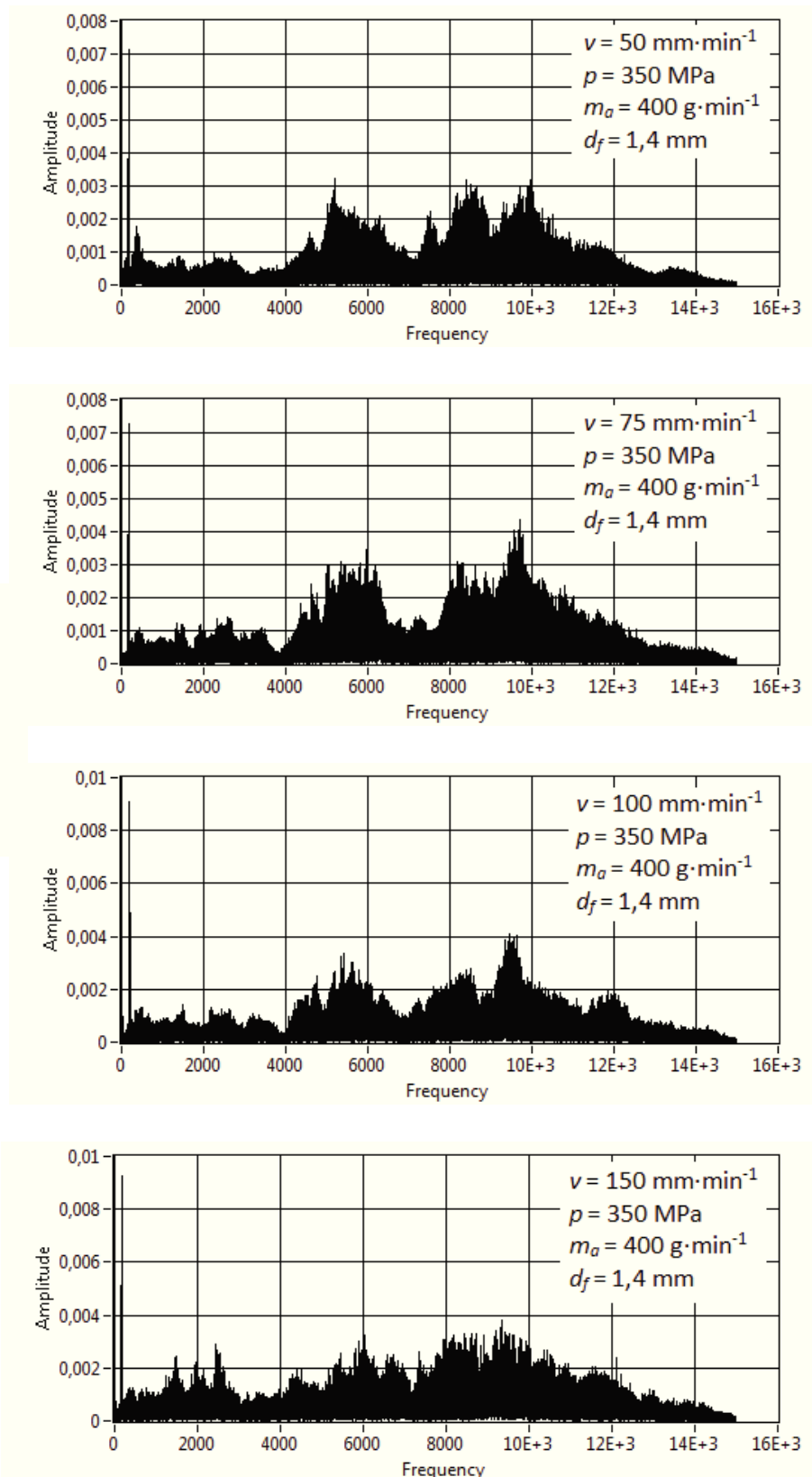
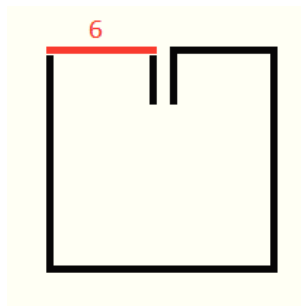
Obrázek Obr. 5.35 z předchozí strany znázorňuje FFT spektra sady vzorků C pro čtvrtý úsek. U všech čtyř rychlostí nejsou amplitudy na frekvencích 0 až 4kHz nikterak výrazné. Navýšení se objevuje na oblasti od 4kHz do 11kHz. U rychlosti 50 mm.min<sup>-1</sup> pouze dva vrcholky na frekvencích okolo 8kHz a 9,5kHz přesahují hodnotu 0,002. Rychlost 75 mm.min<sup>-1</sup> má na frekvencích 4kHz do 11kHz tři výrazné vrcholky amplitud. Jejich poloha je na 6kHz, 8kHz, 9,5kHz. Poslední dva vrcholky mají nejvyšší hodnotu z celého spektra, která se blíží 0,0025. U 100 mm.min<sup>-1</sup> se také objevují tři výraznější vrcholky amplitud. Na frekvenci 5kHz jsou amplitudy s nejvyššími hodnotami u této rychlosti. Dosahují hodnoty 0,003. Další dva vrcholky se také přibližují k této hodnotě na frekvencích 8kHz a 9,5kHz. Nejvyšší posuvová rychlost opět dosahuje nejvyšších amplitud ze všech čtyř rychlostí. Amplitudy se pohybují pod hodnotou 0,002. Na rozsahu od 5kHz do 10kHz amplitudy tuto hranici překračují a ve třech nárůstech se pohybují okolo hodnoty 0,003. Nejvyšší amplituda se objevuje na frekvenci 5,5kHz a dosahuje téměř hodnoty 0,004.



Obr. 5.36 Porovnání FFT spekter úseku 5 vzorku C, materiálu AISI 309,  $b = 15 \text{ mm}$  při čtyřech rychlostech kde  $v_1 = 50 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $v_2 = 75 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $v_3 = 100 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $v_4 = 150 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $p = 350 \text{ MPa}$ ,  $m_a = 400 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $d_f = 1.4 \text{ mm}$

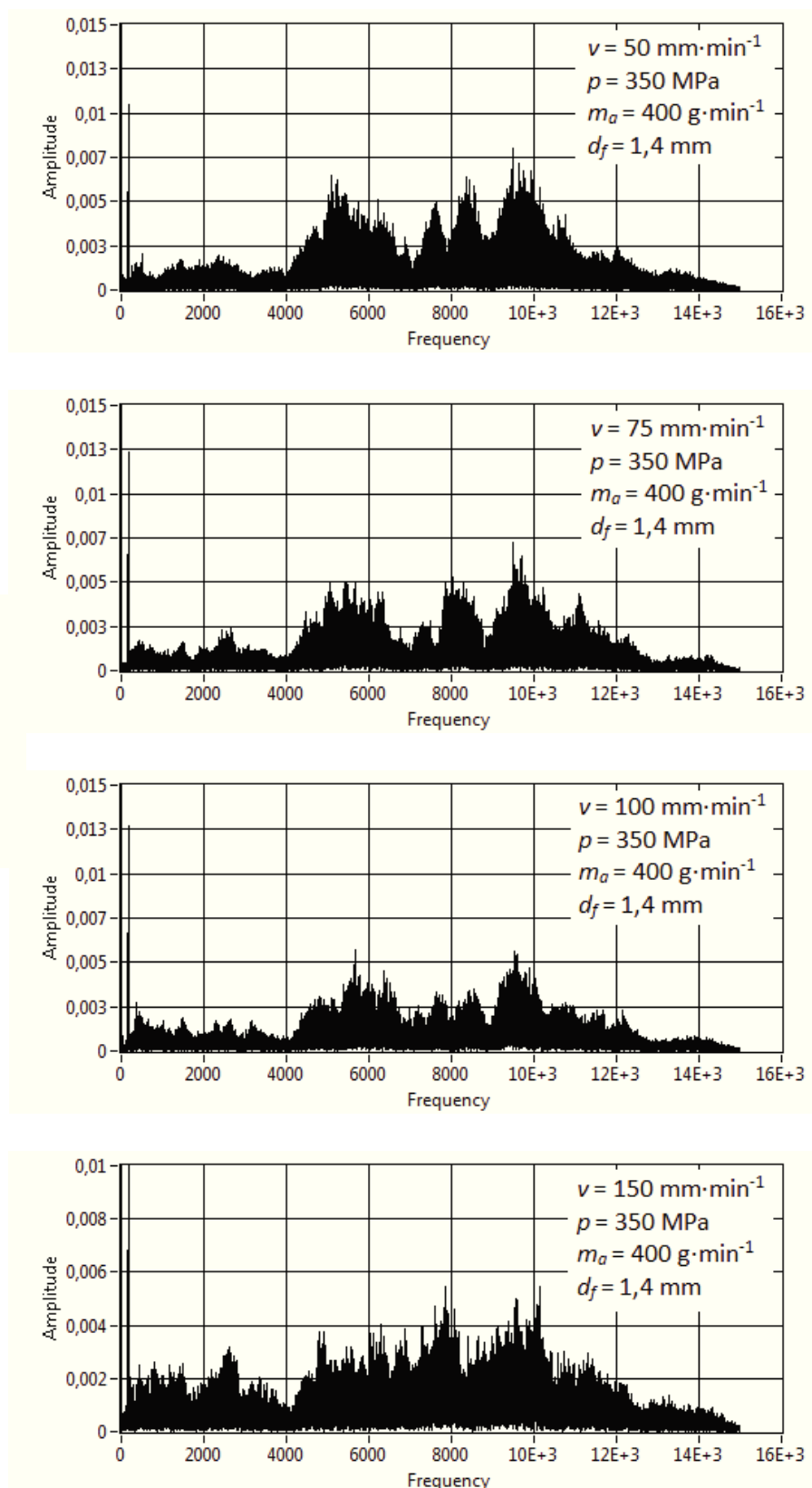
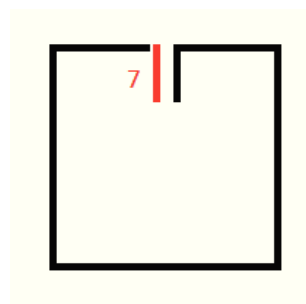


Na obrázku Obr. 5.36 jsou čtyři FFT spektra pro různé rychlosti posuvu řezné hlavy na pátém úseku vzorků sady C. Hodnoty amplitud u prvních třech řezných rychlostí do frekvence 5kHz nepřesahují hranici 0,001. Přes toto číslo se amplitudy dostávají na rozsazích 5kHz až 7kHz a 8kHz až 11kHz. Maximální hodnoty amplitud se objevují na frekvenci 9,5kHz. Pro rychlosti  $50 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  a  $75 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  mají tyto maximální hodnoty 0,002. U rychlosti  $100 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  se hodnoty na této frekvenci pohybují v okolí 0,0025. Amplitudy u rychlosti  $150 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  se pohybují ve vyšších hodnotách. Přesto však do frekvence 4kHz hodnotu 0,002 nepřesáhnou. Navýšení amplitud nad tuto hranici je patrné od 4,5kHz po 10,5kHz. Nejvyšší amplitudy dosahují hodnoty téměř 0,004 na frekvenci 9,5kHz.



Obr. 5.37 Porovnání FFT spekter úseku 6 vzorku C, materiálu AISI 309,  $b = 15 \text{ mm}$  při čtyřech rychlostech kde  $v_1 = 50 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $v_2 = 75 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $v_3 = 100 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $v_4 = 150 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $p = 350 \text{ MPa}$ ,  $m_a = 400 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $d_f = 1,4 \text{ mm}$

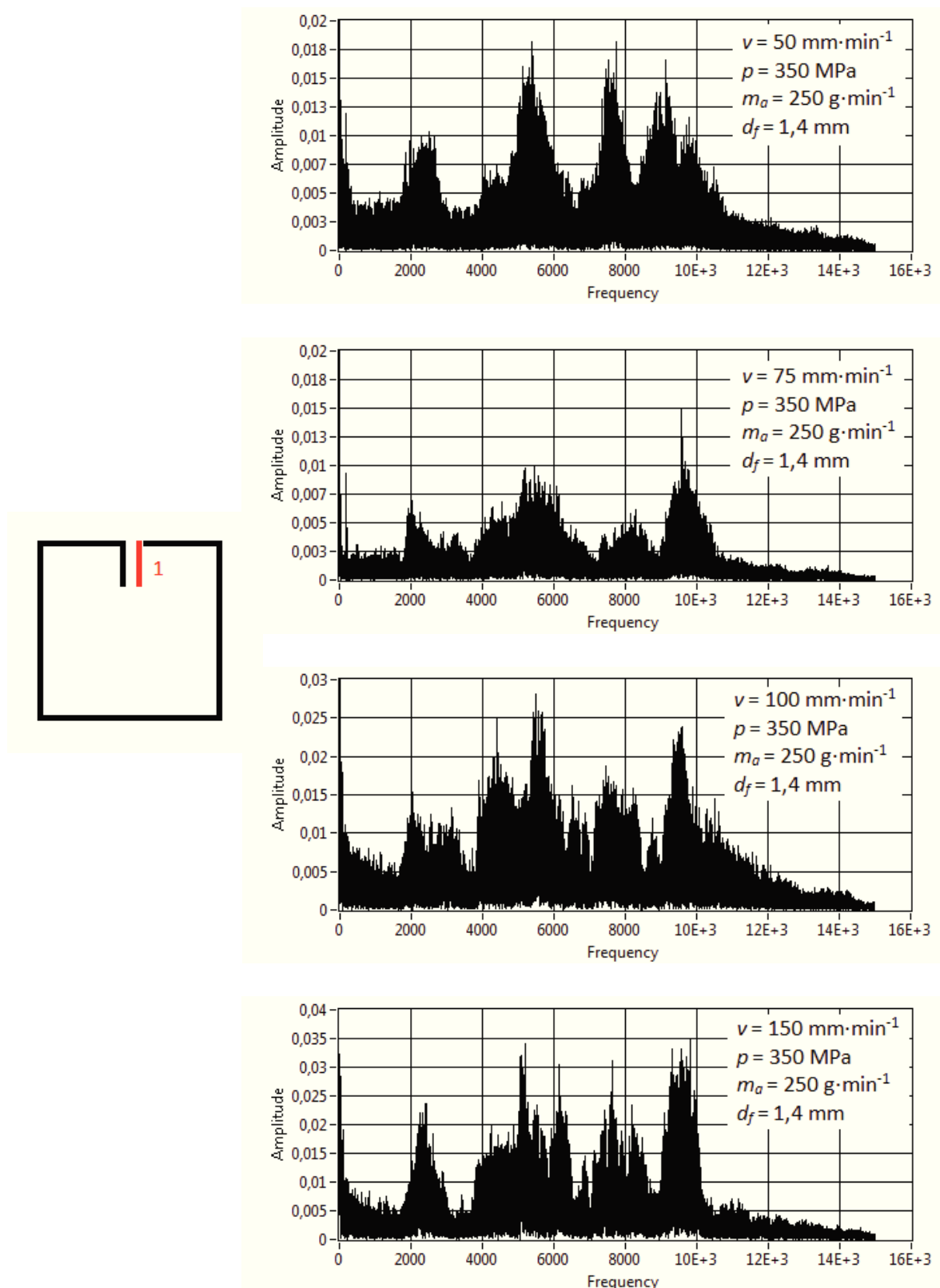
Na obrázku Obr. 5.37 jsou FFT spektra pro šesté úseky ze sady vzorků C. Při řezných parametrech  $m_a = 400 \text{ g.min}^{-1}$ , průměru zaostřovací trubice  $d_f = 1,4 \text{ mm}$  a tlaku  $p = 350 \text{ MPa}$  se mechanické uvolnění součástky tak nepodepsalo na vzrůstu hodnot amplitud. Hodnoty jsou přibližně stejné jako u pátého úseku. Všechny čtyři spektra vypadají podobně. Vykazují nárůst amplitud v oblastech od 4kHz po 7kHz a druhý nárůst od 7kHz po 12kHz. U rychlostí  $50 \text{ mm.min}^{-1}$ ,  $75 \text{ mm.min}^{-1}$  a  $100 \text{ mm.min}^{-1}$ , se v těchto oblastech objevují tři vrcholky amplitud. V případě rychlosti  $50 \text{ mm.min}^{-1}$  amplitudy příliš nepřesahují hodnotu 0,003. U následujících dvou rychlostí je ale vrcholek na 9,5kHz vyšší a přesahuje hranici 0,004. Amplitudy u rychlosti posuvu  $150 \text{ mm.min}^{-1}$  se dají rozdělit do dvou navýšení. První se vyskytuje na začátku frekvencí v oblasti mezi 1kHz a 3kHz. Jsou zde dobře viditelné tři vrcholky amplitud z nichž nejvyšší dosahuje na hodnotu 0,003. Druhé navýšení hodnot amplitud je na frekvencích od 4kHz po 12kHz. V místě 7kHz je propad hodnot pod 0,002. Nejvyšší amplitudy (o hodnotě 0,004) jsou opět na frekvenci 9,5kHz.



Obr. 5.38 Porovnání FFT spekter úseku 7 vzorku C, materiálu AISI 309,  $b = 15 \text{ mm}$  při čtyřech rychlostech kde  $v_1 = 50 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $v_2 = 75 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $v_3 = 100 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $v_4 = 150 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $p = 350 \text{ MPa}$ ,  $m_a = 400 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $d_f = 1,4 \text{ mm}$

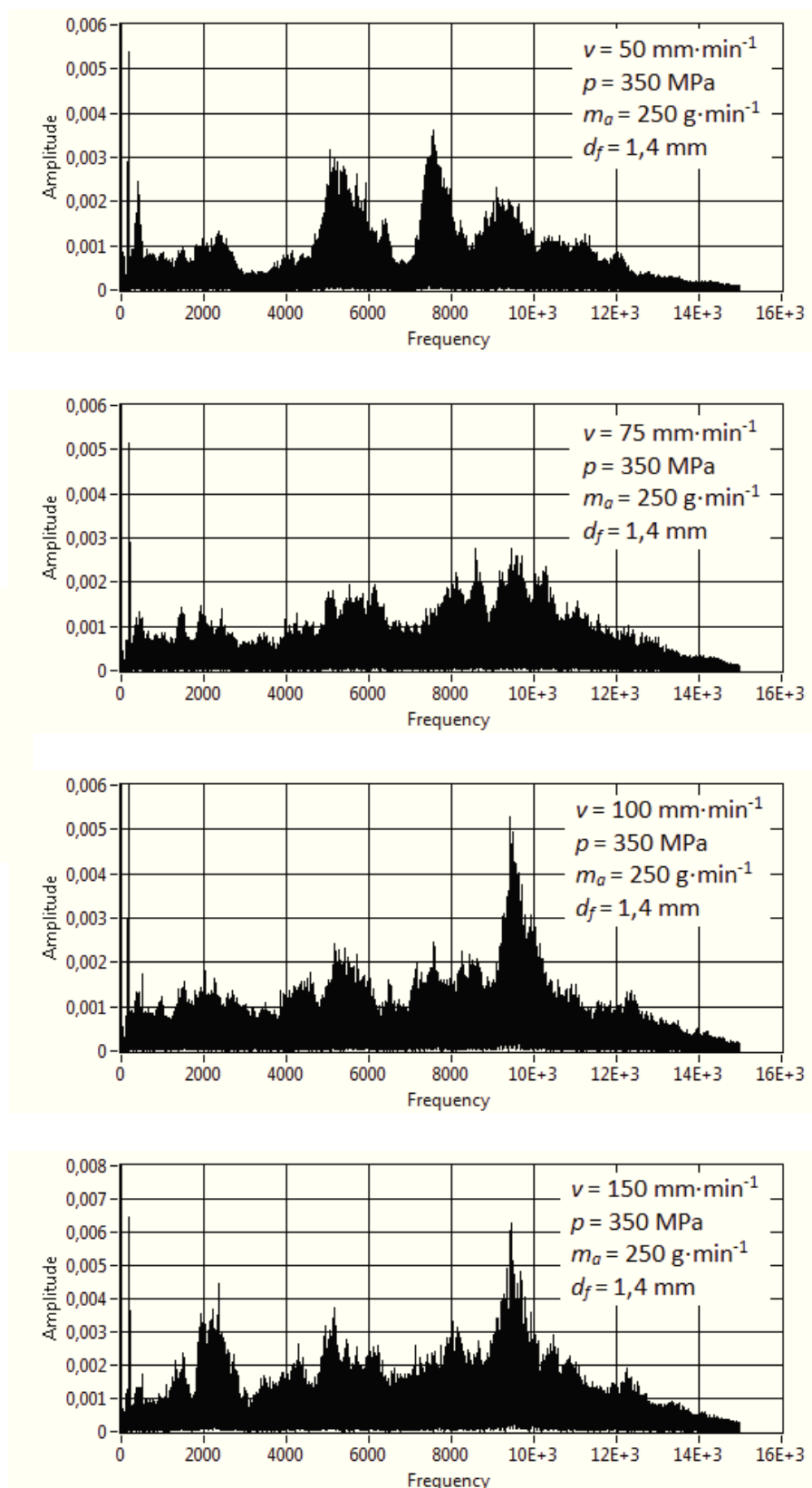
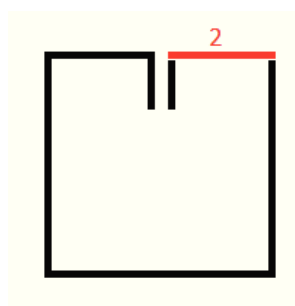
Na obrázku Obr. 5.38 jsou zobrazeny amplitudy FFT spekter pro poslední, sedmý úsek vzorků C. V tomto případě mají amplitudy s rostoucí řeznou rychlostí tendenci klesat. Na rozsahu frekvencí od 0kHz do 4kHz nejsou amplitudy výrazné. Od hranice 4kHz amplitudy vykazují nárůst. První navýšení je v oblasti mez 4kHz a 7kHz a v případě rychlosti  $50 \text{ mm.min}^{-1}$  je vrcholek na 5kHz o hodnotě 0,006. U následujících dvou rychlostí ( $75 \text{ mm.min}^{-1}$ ,  $100 \text{ mm.min}^{-1}$ ) je patrná klesající tendence amplitud v tomto rozsahu frekvencí. U rychlosti  $100 \text{ mm.min}^{-1}$  se většina amplitud pohybuje pod hranicí 0,005. Druhý nárůst amplitud je na oblasti frekvencí od 7kHz a 11kHz s výrazným propadem hodnot na 7kHz. I zde je pozorovatelný pokles hodnot amplitud s rostoucí řeznou rychlostí. Nejvyšší amplitudy jsou na 9,5kHz. U rychlosti  $50 \text{ mm.min}^{-1}$  s hodnotou 0,007 a u rychlosti  $100 \text{ mm.min}^{-1}$  hodnota klesla nad hranici 0,005. Rychlost  $150 \text{ mm.min}^{-1}$  má amplitudy trochu odlišnější od předchozích posuvů. Na počátečních frekvencích se amplitudy pohybují do 0,003. Od frekvence 4kHz do 10,5kHz se vrcholky amplitud pohybují těsně pod hranicí 0,004 s výjimkou dvou vrcholů na 8kHz a 10kHz, kde amplitudy přesahují 0,005.

#### 5.2.4. Analýza FFT spekter sady vzorků D



Obr. 5.39 Porovnání FFT spekter úseku 1 vzorku D, materiálu AISI 309,  $b = 15 \text{ mm}$  při čtyřech rychlostech kde  $v_1 = 50 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $v_2 = 75 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $v_3 = 100 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $v_4 = 150 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $p = 350 \text{ MPa}$ ,  $m_a = 250 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $d_f = 1,4 \text{ mm}$

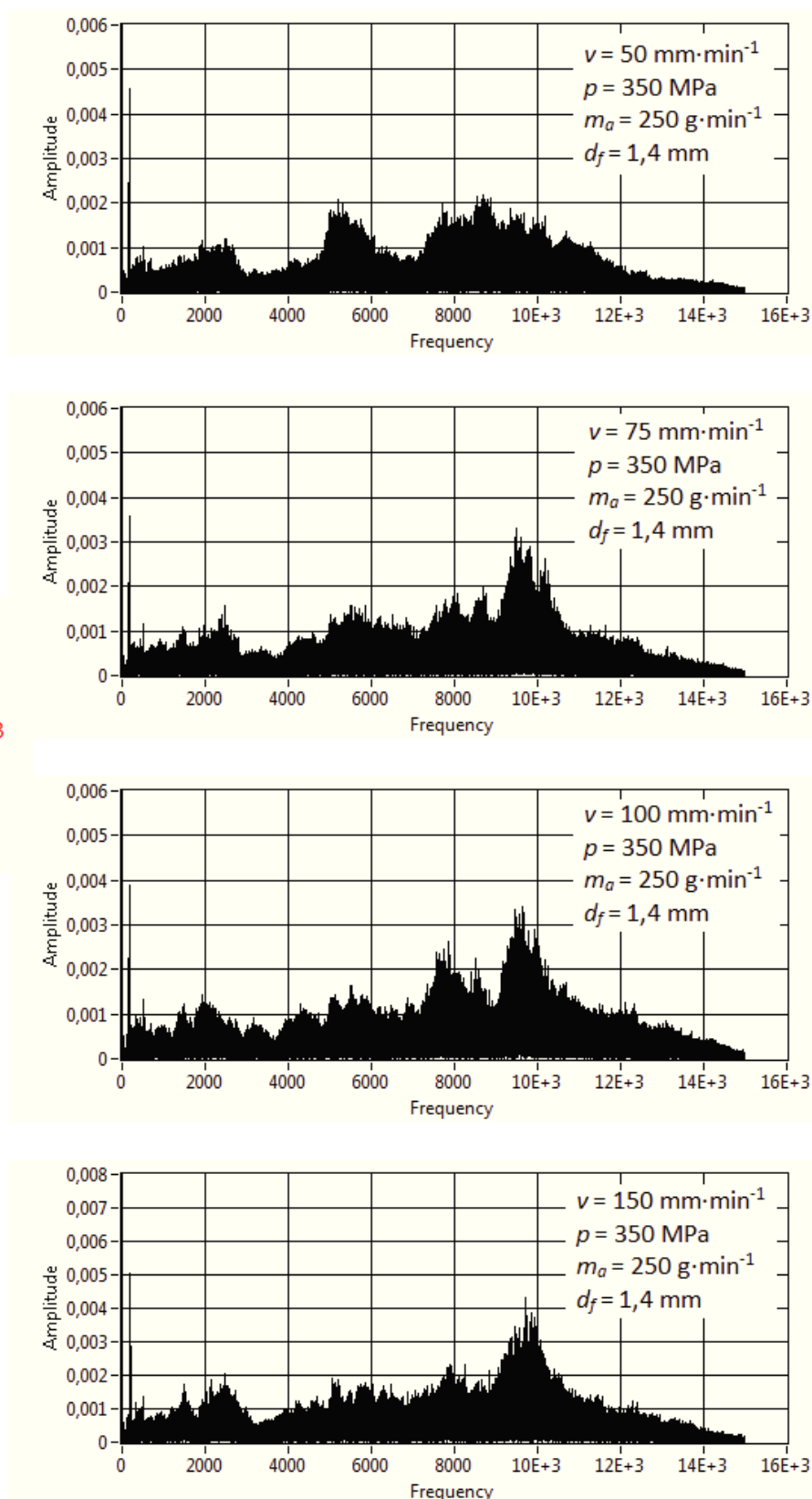
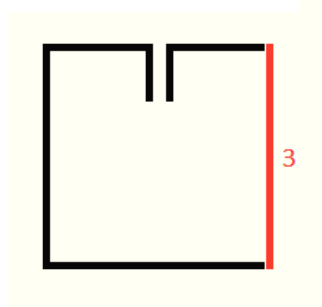
Na obrázku Obr. 5.39 jsou čtyři FFT spektra pro čtyři řezné rychlosti na prvním úseku řezu sady vzorků D. Všechny čtyři spektra mají přibližně stejný tvar amplitud. Na rozmezích 1,5kHz až 3kHz, 4kHz až 7kHz, 7kHz až 8,5kHz a 9kHz až 11kHz jsou výrazné navýšení amplitud. Maximální hodnoty se podle rychlosti posuvu liší. U rychlosti 50 mm.min<sup>-1</sup> jsou nejvyšší hodnoty amplitud na frekvenci 5,5kHz a 7,5kHz. Amplitudy na těchto dvou frekvencích přesahují hodnotu 0,018. U rychlosti 75 mm.min<sup>-1</sup> se hodnota amplitud zmenšila. I ve jmenovaných nárůstech se amplitudy nedostaly, až na jednu výjimku na 9,5kHz, přes hodnotu 0,01. Při následujících dvou rychlostech hodnota amplitud při rostoucím řezném posuvu stoupá. Nejvyšší amplitudy u rychlosti posuvu 100 mm.min<sup>-1</sup> jsou na frekvenci 5,5kHz. Při rychlosti 150 mm.min<sup>-1</sup> jsou maximální amplitudy na dvou místech. Na frekvenci 5kHz a 9,5kHz. Zde hodnoty vystoupali až k 0,035.



Obr. 5.40 Porovnání FFT spekter úseku 2 vzorku D, materiálu AISI 309,  $b = 15 \text{ mm}$  při čtyřech rychlostech kde  $v_1 = 50 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $v_2 = 75 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $v_3 = 100 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $v_4 = 150 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $p = 350 \text{ MPa}$ ,  $m_a = 250 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $d_f = 1.4 \text{ mm}$

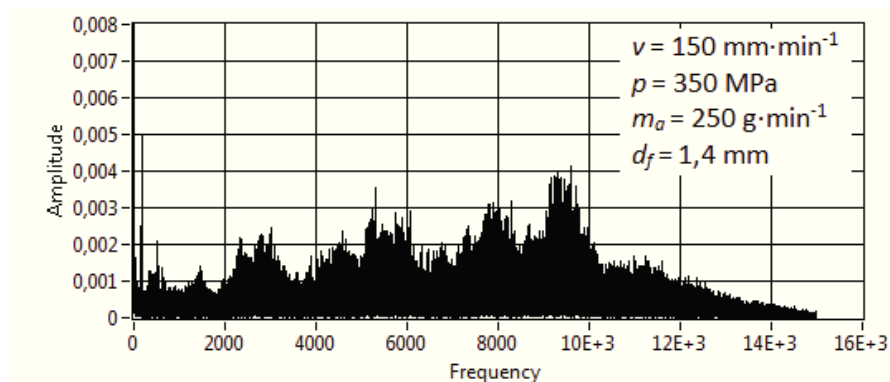
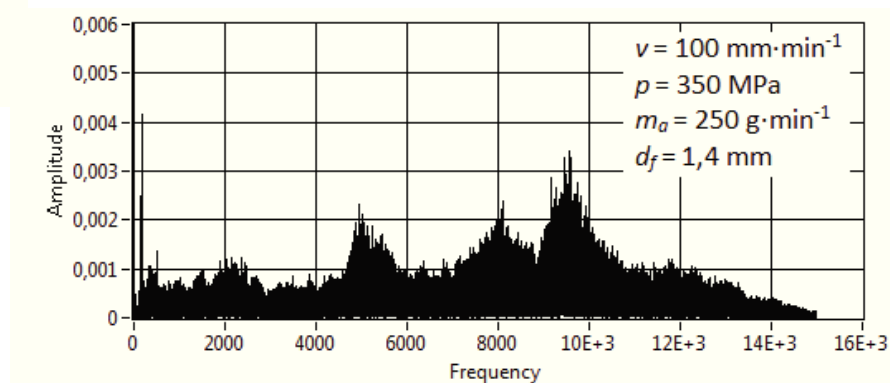
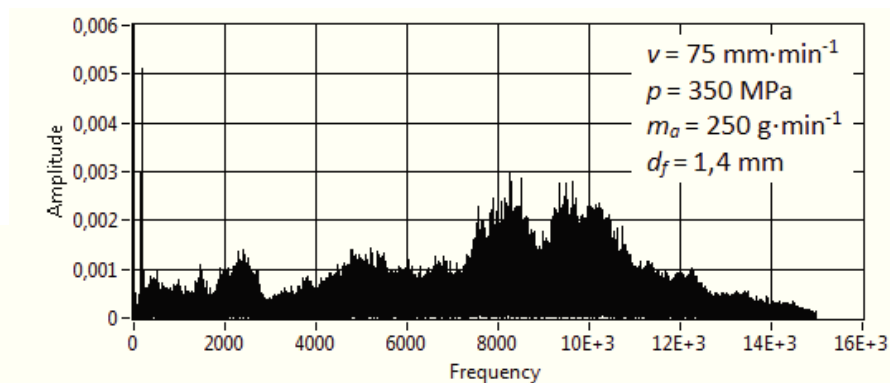
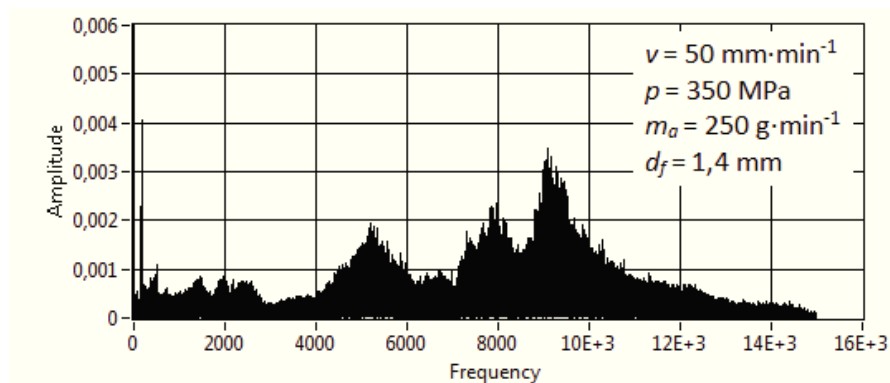
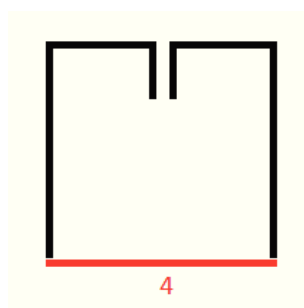


Na obrázku Obr. 5.40. jsou FFT spektra pro čtyři rychlosti posuvu ( $50 \text{ mm.min}^{-1}$ ,  $75 \text{ mm.min}^{-1}$ ,  $100 \text{ mm.min}^{-1}$ ,  $150 \text{ mm.min}^{-1}$ ) na druhém úseku ze sady vzorků D. U rychlosti  $50 \text{ mm.min}^{-1}$  je první výraznější zvýšení amplitudy přibližně na  $400 \text{ Hz}$ . Amplitudy dosahují hodnoty  $0,0025$  pak strmě klesají pod hranici  $0,001$ . Velmi dobře viditelná zvýšení amplitud je na frekvencích o rozsahu od  $4,5 \text{ kHz}$  po  $6,5 \text{ kHz}$  a od  $7 \text{ kHz}$  po  $11 \text{ kHz}$ . V prvním navýšení amplitud se dostáváme k hodnotám nad  $0,003$  na frekvenci  $5 \text{ kHz}$ . Druhé navýšení amplitud je rozděleno do dvou vrcholů amplitud. Nejvyšší hodnoty se objevují na frekvenci  $7,5 \text{ kHz}$  a dosahují hodnot  $0,0035$ . Při rychlosti  $75 \text{ mm.min}^{-1}$  se hodnoty amplitud hranici  $0,003$  nepřerostly. Amplitudy se při této rychlosti výrazněji navyšují na dvou místech. První se nachází mezi frekvencemi  $4,5 \text{ kHz}$  a  $6,5 \text{ kHz}$  a dosahuje hodnot téměř  $0,002$ . Druhé, výraznější, navýšení má polohu mezi  $7 \text{ kHz}$  a  $11 \text{ kHz}$ . Zde se objevují nejvyšší hodnoty amplitud tohoto FFT spektra. Amplitudy se na  $8,5 \text{ kHz}$  a  $9,5 \text{ kHz}$  přibližují k hranici  $0,003$ . Následující dvě rychlosti mají charakter FFT spekter velmi tvarově podobný. U rychlosti  $150 \text{ mm.min}^{-1}$  jsou na rozsahu  $2 \text{ kHz}$  až  $3 \text{ kHz}$  vyšší hodnoty amplitud ( $0,004$ ) než u rychlosti  $100 \text{ mm.min}^{-1}$ . Tyto dvě rychlosti mají společný nejvyšší vrchol, který se nachází na frekvenci  $9,5 \text{ kHz}$ . U rychlosti  $100 \text{ mm.min}^{-1}$  zde amplituda přesahuje hodnotu  $0,005$  a u maximální testované posuvové rychlosti  $150 \text{ mm.min}^{-1}$  amplituda překročí hranici  $0,006$ .



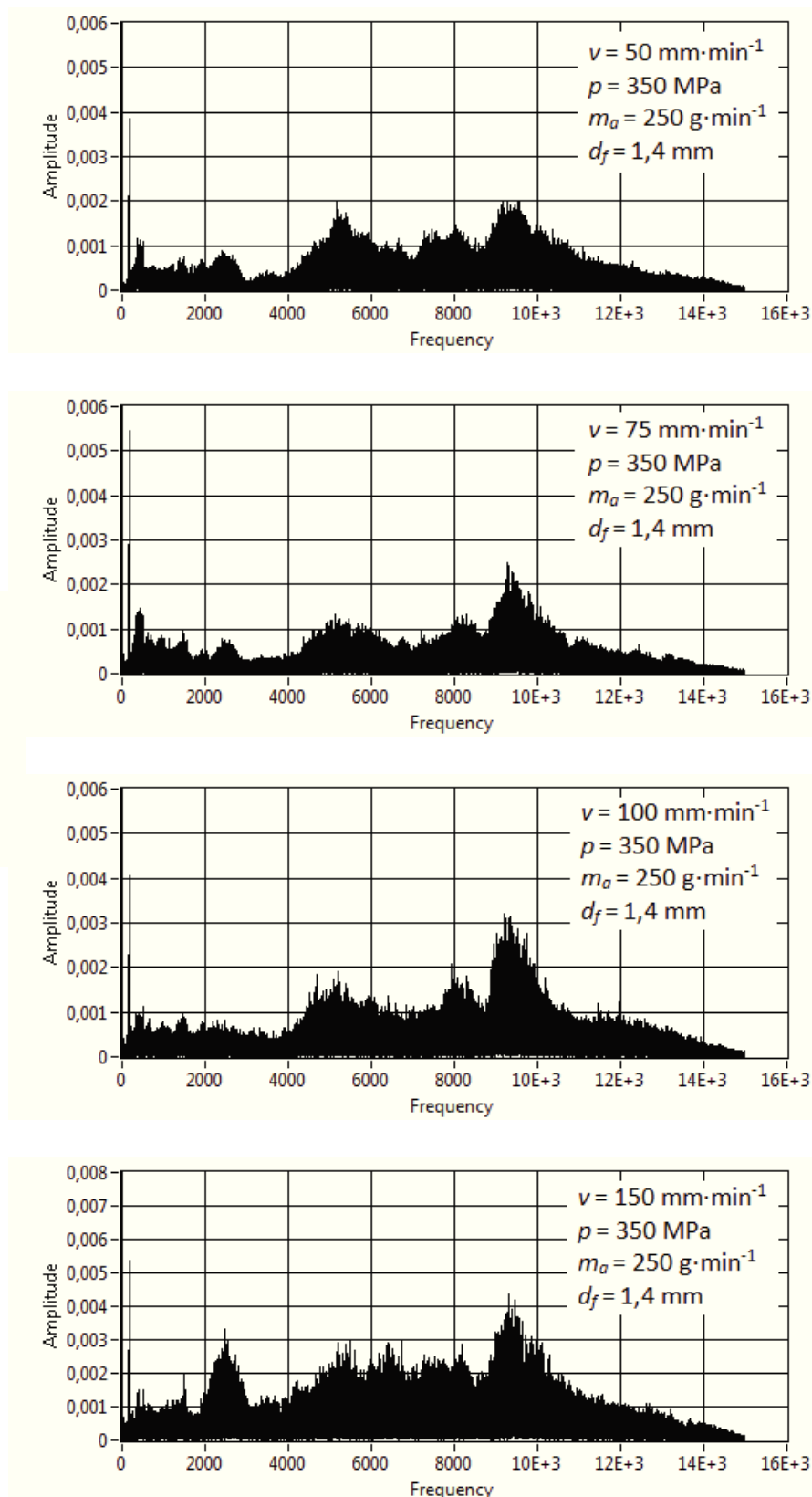
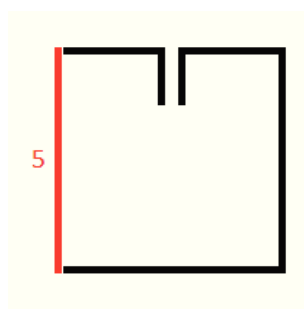
Obr. 5.41 Porovnání FFT spekter úseku 3 vzorku D, materiálu AISI 309,  $b = 15$  mm při čtyřech rychlostech kde  $v_1 = 50$  mm·min<sup>-1</sup>,  $v_2 = 75$  mm·min<sup>-1</sup>,  $v_3 = 100$  mm·min<sup>-1</sup>,  $v_4 = 150$  mm·min<sup>-1</sup>,  $p = 350$  MPa,  $m_a = 250$  g·min<sup>-1</sup>,  $d_f = 1.4$  mm

Na obrázku Obr. 5.41 je porovnání FFT spekter sady vzorků D na třetím úseku. U rychlosti  $50 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  se hodnoty do frekvence 4,5 pohybují maximálně kolem 0,001. Na následujícím rozsahu 5kHz až 6kHz se amplitudy přiblíží k číslu 0,002 a pak klesají zpět na původní hodnoty. Druhé navýšení je již výraznější. Je mezi 7kHz a 11kHz a amplitudy na tomto úseku dosahují maximálních hodnot 0,002. Přesně se toto maximum nachází na 8,5 kHz. Rychlosti  $75 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $100 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  a  $150 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  mají amplitudy tvarově stejné. Je zřejmé, že s rostoucí posuvovou rychlostí se jejich hodnota zvyšuje. U těchto rychlostí se amplitudy na frekvencích od 0 kHz po 7 kHz nedostanou přes hodnotu 0,002. Společný výrazný nárůst hodnot je patrný až od frekvence 7,5 kHz po 11 kHz. V tomto navýšení se nachází vrcholek s maximální hodnotou amplitud (9,5 kHz). U rychlosti  $75 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  mají amplitudy hodnoty přes 0,003. Se zvyšujícím se posuvem se tato maximální hodnota narůstá. Při posuvové rychlosti  $150 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  amplitudy přesahují hodnotu 0,004.



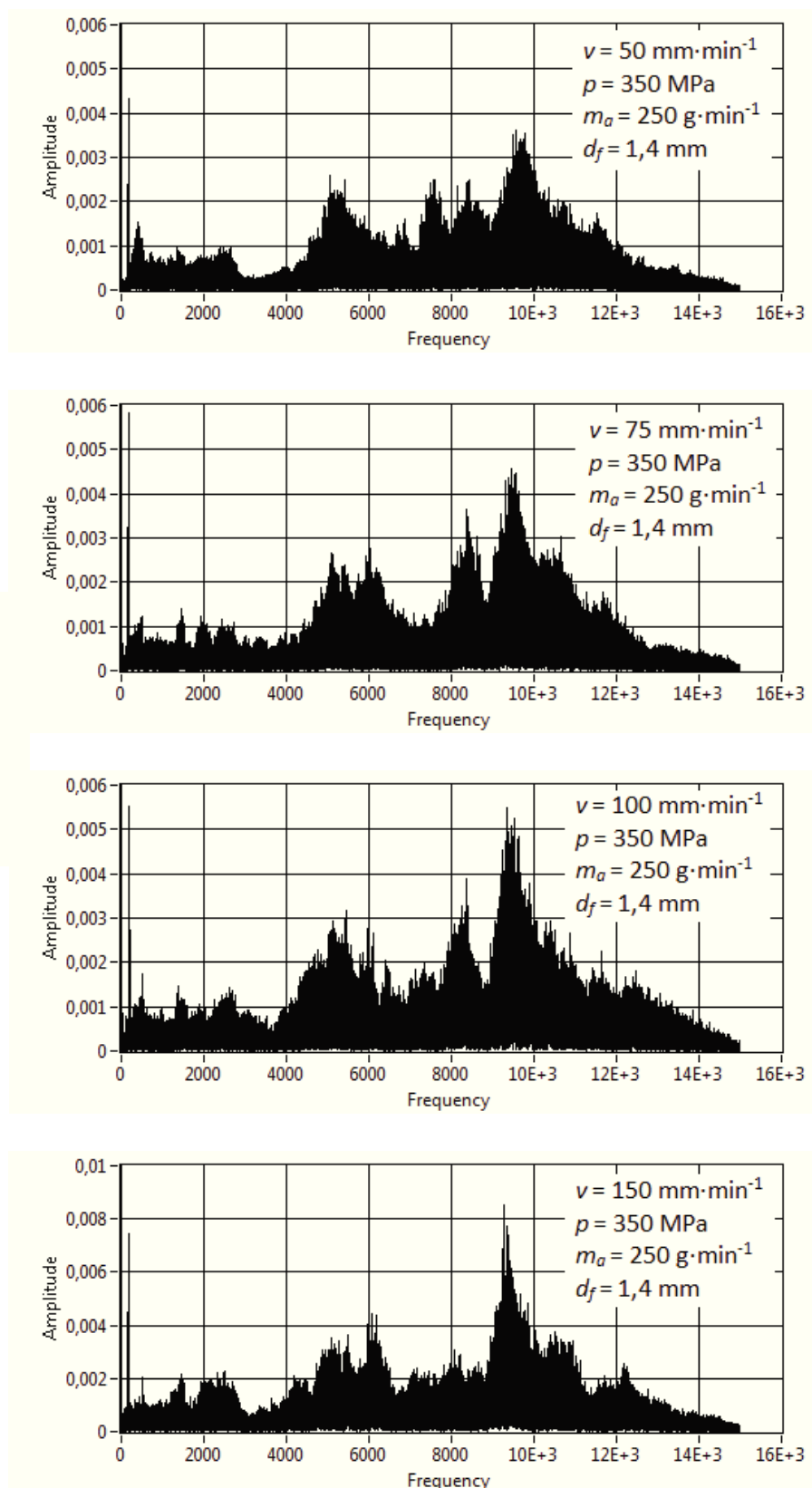
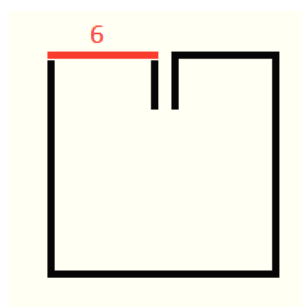
Obr. 5.42 Porovnání FFT spekter úseku 4 vzorku D, materiálu AISI 309,  $b = 15 \text{ mm}$  při čtyřech rychlostech kde  $v_1 = 50 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $v_2 = 75 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $v_3 = 100 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $v_4 = 150 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $p = 350 \text{ MPa}$ ,  $m_a = 250 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $d_f = 1.4 \text{ mm}$

Obrázek Obr. 5.42 obsahuje FFT spektra pro čtyři různé posuvové rychlosti. Tyto spektra se vztahují na čtvrté úseky vzorků sady D. Rychlost  $50 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  vykazuje první nárůst amplitud v rozmezí 4 kHz a 6 kHz. Vrcholek je na 5 kHz, ale nepřesáhne hodnotu 0,002. Další dva vrcholky jsou v nárůstu hodnot amplitud mezi frekvencemi 7 kHz a 11 kHz. Nejvyšší amplituda na tomto rozsahu je přesně na frekvenci 9 kHz a dosahuje hodnoty 0,0035. Rychlost  $75 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  obsahuje pouze jednu oblast výrazného navýšení hodnot amplitud v rozmezí frekvencí 7 kHz a 11 kHz. V tomto navýšení ovšem maximální hodnoty nepřesáhnou hranici 0,003. Při rychlosti  $100 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  se amplitudy do 4,5 kHz drží pod 0,001. Pak se objevují tři vrcholky amplitud na frekvencích 5 kHz, 8 kHz a 9,5 kHz. Nejvyšší hodnoty dosahují amplitudy na vrcholku při 9,5 kHz (0,003). V FFT spektru pro rychlost posuvu  $150 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  se objevují opět nejvyšší hodnoty amplitud ze všech rychlostí. Už od frekvence 2 kHz amplitudy vzrostly k hodnotám 0,002. Okolo frekvencí 5,5 kHz, 8 kHz a 9,5 kHz se amplitudy dále zvyšují. Nejvyšší amplitudy o hodnotě 0,004 jsou na frekvenci 0,95 kHz.



Obr. 5.43 Porovnání FFT spekter úseku 5 vzorku D, materiálu AISI 309,  $b = 15 \text{ mm}$  při čtyřech rychlostech kde  $v_1 = 50 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $v_2 = 75 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $v_3 = 100 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $v_4 = 150 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $p = 350 \text{ MPa}$ ,  $m_a = 250 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $d_f = 1.4 \text{ mm}$

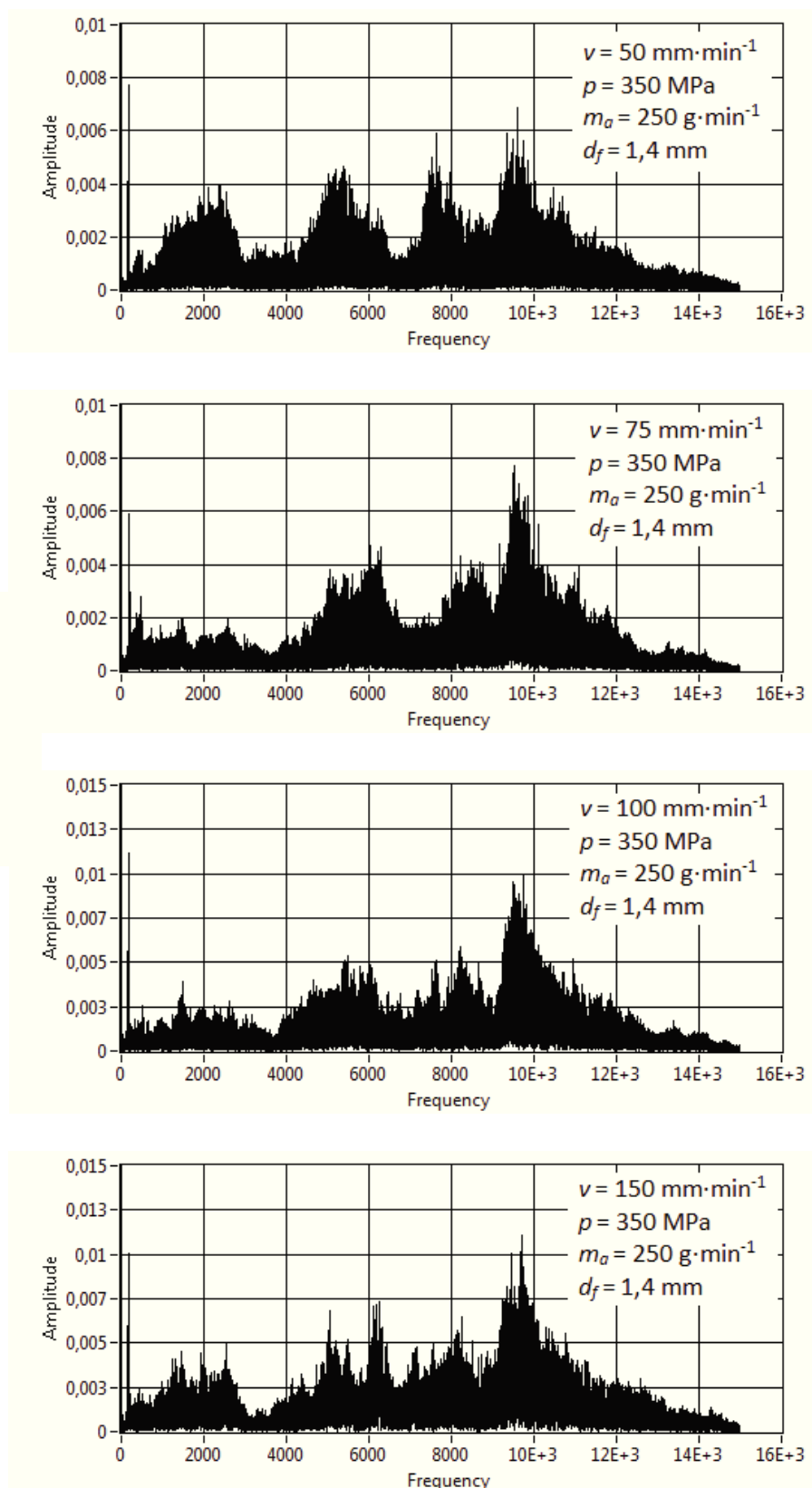
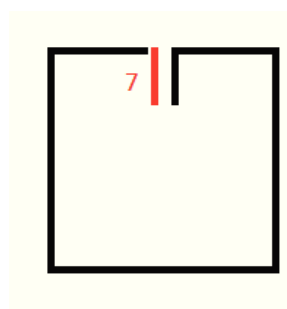
Porovnání FFT spekter na pátém úseku sady D je zobrazeno na obrázku Obr. 5.43. Na tomto úseku si jsou jednotlivá spektra podobná. Všechny obsahují nárůst amplitud od frekvence 4 kHz do 11 kHz. U rychlosti  $50 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  se v této oblasti objevují dva vrcholy amplitud, které shodně ukazují hodnotu 0,002. Jeden vrchol je okolo 5 kHz a druhý na 9,5 kHz. U rychlosti  $75 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  je výrazný vrcholek amplitud jenom na hodnotě 9,5 kHz. Se zvyšující se rychlostí rostou i hodnoty amplitud. Rychlost  $100 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  má nejvyšší hodnoty amplitud také na frekvenci 9,5 kHz a dosahuje 0,003. Poslední řezná rychlost se od ostatních spekter liší vrcholkem amplitud na 3 kHz, kde amplitudy dosahují na hodnotu 0,003. K této hranici se přibližují i amplitudy v rozsahu frekvencí od 5 kHz po 10 kHz. Na frekvenci 9,5 kHz se opět objevují maximální amplitudy, které v tomto případě mají hodnotu 0,004.



Obr. 5.44 Porovnání FFT spekter úseku 6 vzorku D, materiálu AISI 309,  $b = 15$  mm při čtyřech rychlostech kde  $v_1 = 50$  mm·min<sup>-1</sup>,  $v_2 = 75$  mm·min<sup>-1</sup>,  $v_3 = 100$  mm·min<sup>-1</sup>,  $v_4 = 150$  mm·min<sup>-1</sup>,  $p = 350$  MPa,  $m_a = 250$  g·min<sup>-1</sup>,  $d_f = 1.4$  mm



Na obrázku Obr. 5.44 jsou FFT spektra pro šestý úsek sedy vzorků D. Na tomto úseku hodnoty amplitud dosahují vyšších hodnot než na předchozích úsecích. To mohlo být způsobeno mechanickým oddělováním řezaného vzorku. Tento jev se projevuje také na sedmém úseku, kde jsou amplitudy ještě vyšší. Do frekvence 4 kHz jsou nárůsty amplitud u spekter FFT na šestém úseku nevýrazné. Dále však amplitudy až skokově narůstají. Od 4,5 kHz až to 12 kHz amplitudy přesahují hodnotu 0,001. Objevují se vrcholky amplitud, které tuto hranici výrazně přesahují. V případě rychlosti 50 mm.min<sup>-1</sup> jsou vrcholky čtyři. První tři o stejné hodnotě 0,0025 jsou rozmístěny na frekvencích 5 kHz, 7,5 kHz a 8,5 kHz. 4tvrtý nejvyšší vrcholek s hodnotou 0,0035 je na frekvenci 9,5 kHz. Rychlost 75 mm.min<sup>-1</sup> vykazuje také čtyři výrazné nárůsty o poloze 5 kHz, 7,5 kHz, 8,5 kHz a nejvyšší vrcholek na 9,5 kHz. Maximální hodnoty při této rychlosti jsou 0,0035, ostatní vrcholky se zastavili na hodnotě 0,0025. Maximální hodnoty amplitud dále se zvyšující se rychlostí posuvu rostou. Poloha nejvyšší amplitudy je i pro zbylé dvě řezné rychlosti stejná. V případě posuvu 100 mm.min<sup>-1</sup> amplitudy dosahují hodnot přes 0,005 a u rychlosti 150 mm.min<sup>-1</sup> přesáhla amplituda hranici 0,008.

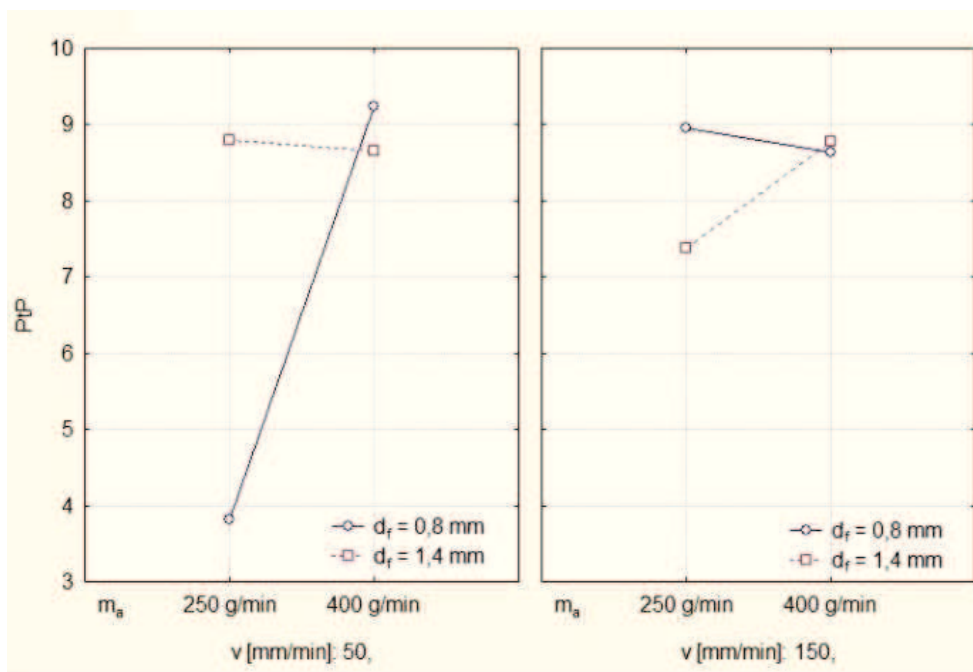


Obr. 5.45 Porovnání FFT spekter úseku 7 vzorku D, materiálu AISI 309,  $b = 15$  mm při čtyřech rychlostech kde  $v_1 = 50$  mm·min<sup>-1</sup>,  $v_2 = 75$  mm·min<sup>-1</sup>,  $v_3 = 100$  mm·min<sup>-1</sup>,  $v_4 = 150$  mm·min<sup>-1</sup>,  $p = 350$  MPa,  $m_a = 250$  g·min<sup>-1</sup>,  $d_f = 1,4$  mm

Poslední obrázek Obr. 5.45 s FFT spektry srovnává rychlosti posuvu na sedmém úseku sady vzorků D. U rychlosti  $50 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  se objevují čtyři výrazné nárůsty amplitud v oblastech frekvencí od 1 kHz po 3 kHz, 4,5 kHz až 6,5 kHz, 7,5 kHz až 9 kHz a od 9 kHz po 11 kHz. Na těchto místech amplitudy dosahují hodnot 0,004; 0,0045; 0,006 a 0,007. Maximální amplitudy se u všech rychlostí nacházejí na stejné frekvenci 9,5 kHz. U rychlosti  $75 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  se amplitudy pohybují do frekvence 4,5 kHz většinou pod 0,002. Dále se objevují dva výrazné nárůsty hodnot amplitud. Jeden vrcholek se nachází na 6 kHz s hodnotou amplitudy 0,0045 a druhý vrcholek na již zmíněné frekvenci 9,5 kHz. Zde jsou amplitudy pro rychlost  $75 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  nejvyšší s hodnotami přes 0,006. U následujících rychlostí amplitudy dále rostou. Do frekvence 4 kHz při rychlosti  $100 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  se amplitudy pohybují v hodnotách 0,003 a při rychlosti  $150 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  dosahují amplitudy v dané frekvenci hodnoty 0,005. Nejvyšší amplitudy se nacházejí i u rychlosti  $100 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  a  $150 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ , na frekvenci 9,5 kHz. Hodnota amplitud v tomto místě dosahuje 0,01 a u posuvu  $150 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  amplitudy tuto hodnotu dokonce překročí.

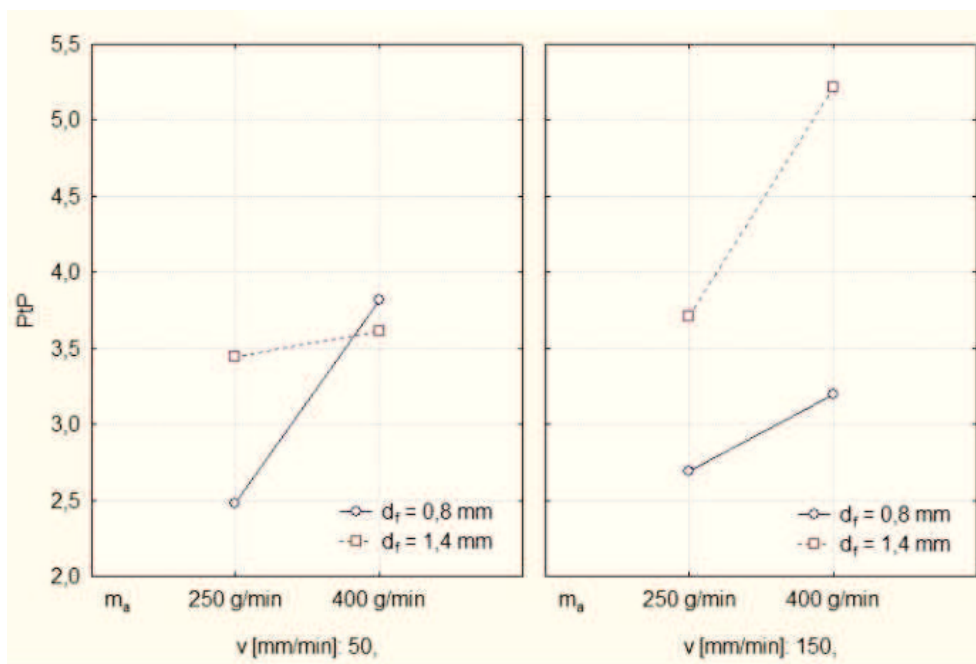
### 5.3. Analýza hodnot Peak to Peak v závislosti na řezných parametrech

V této části budou srovnány hodnoty Peak to Peak (maximálních amplitud) akustické emise v závislosti na řezných parametrech pro jednotlivé úseky vzorků.



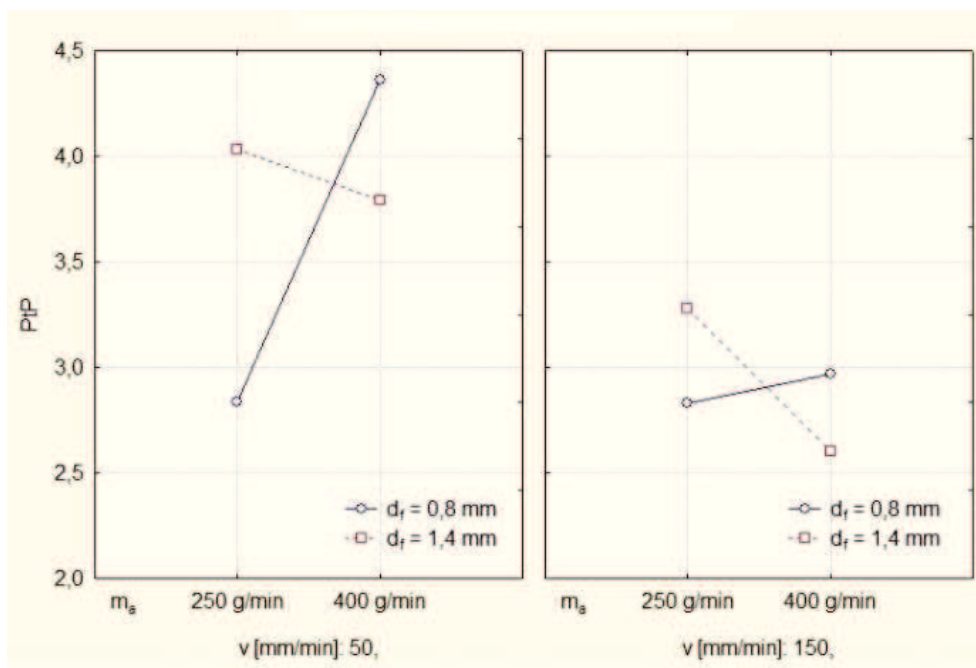
Obr. 5.46 Marginální graf významnosti hmotnostního toku  $m_a$ , rychlosti posuvu  $v$  a průměru zaostřovací trubice  $d_f$  na parametr Peak to Peak na prvním úseku.

Pro první úsek jsou hodnoty peak to peak nejvyšší. Takto se projevuje průstřel materiálu na začátku řezu. Na marginálních grafech je znázorněna závislost hodnot peak to peak na řezných parametrech. Na obrázku Obr. 5.46 je vidět že trend akustické emise je pro každou rychlost jiný.

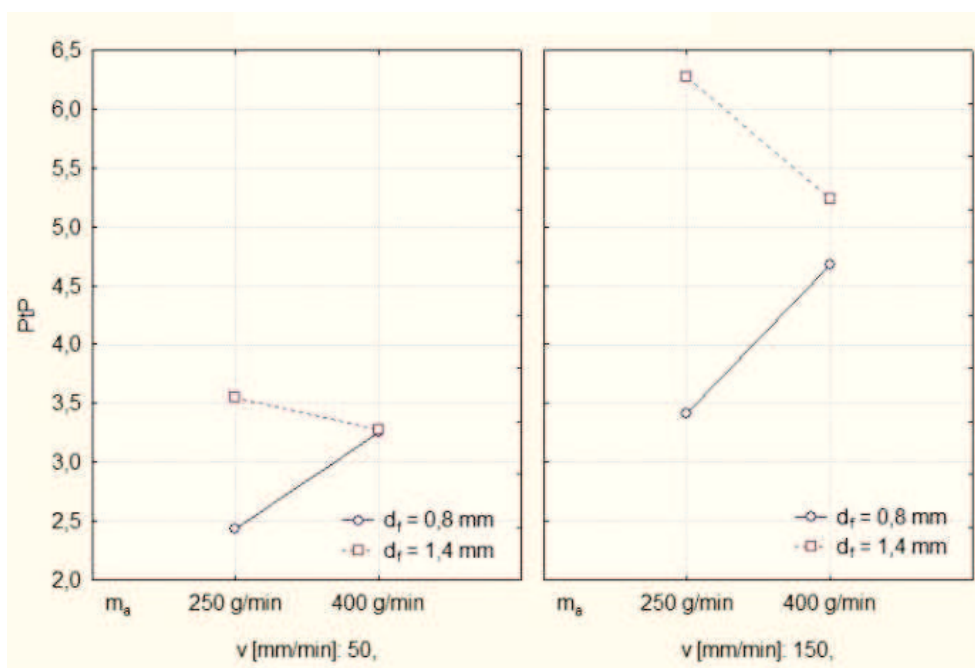


Obr. 5.47 Marginální graf významnosti hmotnostního toku  $m_s$ , rychlosti posuvu  $v$  a průměru zaostřovací trubice  $d_f$  na parametr Peak to Peak na druhém úseku.

Z obrázku Obr. 5.47 je zřejmé že hodnoty peak to peak na druhém úseku s hmotnostním tokem při obou rychlostech soupají. U rychlosti 50 mm.min<sup>-1</sup> je nárůst dost výrazný. Na třetím úseku (Obr. 5.48) PtP s hmotnostním tokem stoupají pouze u zaostřovací trubice s průměrem 0,8mm. U průměru  $d_f = 1,4$  mm naopak hodnoty klesají.

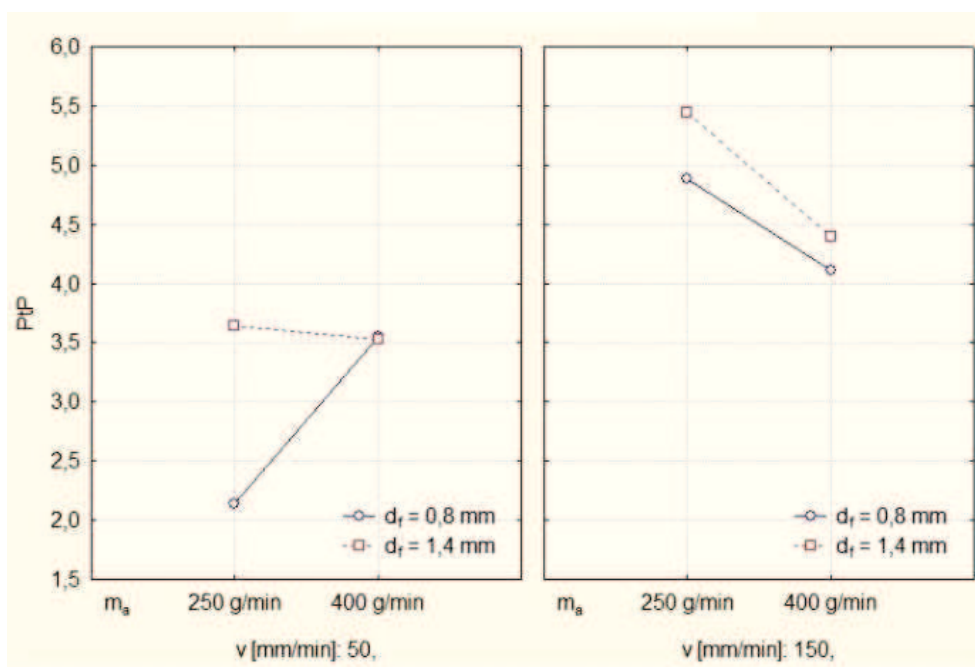


Obr. 5.48 Marginální graf významnosti hmotnostního toku  $m_s$ , rychlosti posuvu  $v$  a průměru zaostřovací trubice  $d_f$  na parametr Peak to Peak na třetím úseku.

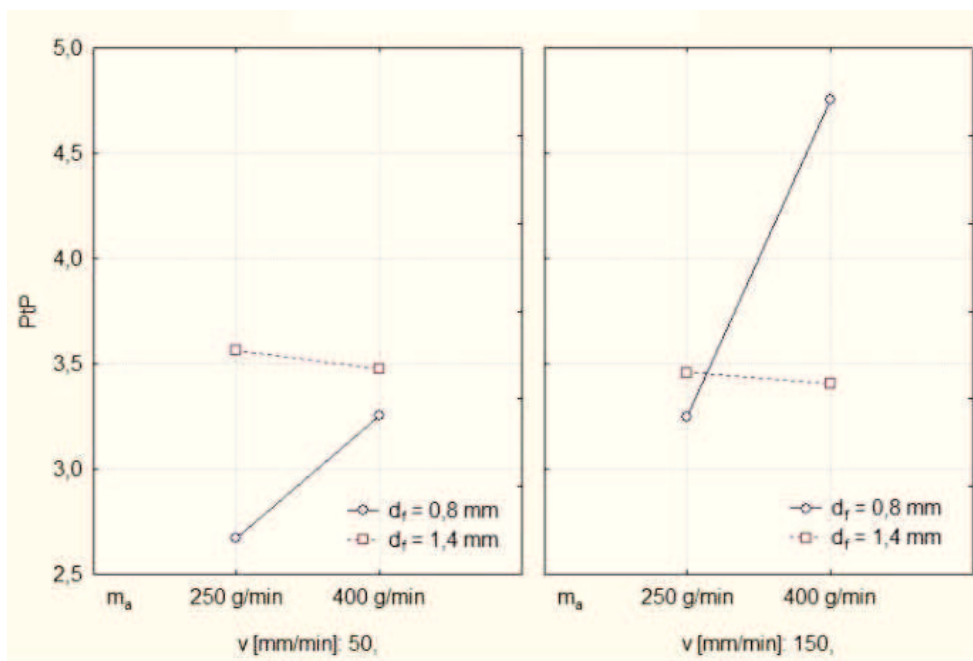


Obr. 5.49 Marginální graf významnosti hmotnostního toku  $m_a$ , rychlosti posuvu  $v$  a průměru zaostřovací trubice  $d_f$  na parametr Peak to Peak na čtvrtém úseku.

Na čtvrtém úseku (Obr. 5.49.) hodnoty PtP vykazují taktéž nárůst u zaostřovací trubice menšího průměru a pokles u trubice s průměrem  $d_f = 1,4$  mm.

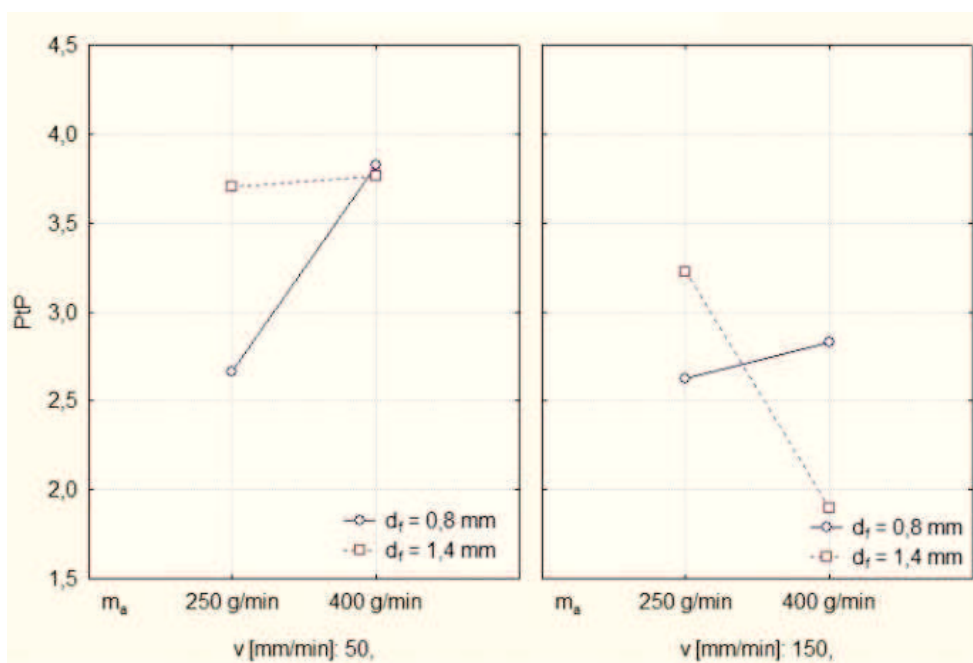


Obr. 5.50 Marginální graf významnosti hmotnostního toku  $m_a$ , rychlosti posuvu  $v$  a průměru zaostřovací trubice  $d_f$  na parametr Peak to Peak na pátém úseku.



Obr. 5.51 Marginální graf významnosti hmotnostního toku  $m_a$ , rychlosti posuvu  $v$  a průměru zaostřovací trubice  $d_f$  na parametr Peak to Peak na šestém úseku.

Růst akustické emise u průměru zaostřovací trubice  $d_f = 0,8$  mm je patrný i u zbývajících úseků 5, 6, 7 (Obr.5.50, Obr.5.51, Obr.5.51). Vyjímkou je pouze pokles na pátém úseku při rychlosti posuvu  $150 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ . Při použití zaostřovací trubice s průměrem  $d_f = 1,4$  mm hodnoty PtP klesají, ale na sedmém úseku při posuvové rychlosti vykazují hodnoty mírný růst.



Obr. 5.52 Marginální graf významnosti hmotnostního toku  $m_a$ , rychlosti posuvu  $v$  a průměru zaostřovací trubice  $d_f$  na parametr Peak to Peak na sedmém úseku.

## 6. Závěr

Obrábění technologií AWJ patří k nekonvenčním metodám. Hlavní výhodou je, že můžeme obrábět jakýkoliv materiál s různými vlastnostmi jako je tvrdost, složení materiálu nebo jeho struktura. Čím více materiálů je možné obrábět, tím se více neznámých se objevuje v procesu dělení AWJ.

V současné době nejsou dostatečně definované všechny závislosti faktorů pro každý materiál u technologie AWJ. Jedním z nich je závislost akustická emise na řezných parametrech. Dříve se na tento jev pohlíželo jako na škodlivý faktor a nejprve byly snahy akustickou emisí (hluk) zmírnit. Dnes se na AE pohlíží jako na nositele informací a kvality probíhajícího řezu. Aby bylo možné využít AE u on-line řízení procesu dělení technologií AWJ, je nutné definovat její závislosti na vstupních parametrech řezného procesu. Zde je prostor pro provedení mnoha měření a popsání projevů akustické emise.

Cílem této práce bylo zjistit závislost akustické emise na hmotnostním toku, průměru zaostřovací trubice a rychlosti řezného posuvu při řezání materiálu AISI 309. Vyrobito se celkem 16 vzorků rozdělených do čtyř sad A, B, C, D. Každá sada byla vyrobena s jiným nastavením řezných faktorů. Vzorky A a B byly pořízeny při hmotnostním toku abraziva  $m_a = 400 \text{ g.min}^{-1}$  a sady C a D při hmotnostním toku  $m_a = 250 \text{ g.min}^{-1}$ . Průměr zaostřovací trubice se měnil následovně: A, a C byly řezány zaostřovací trubicí o průměru 0,8 mm a u sady B, D byl použit průměr  $d_f = 1,4 \text{ mm}$ . V každé sadě byly 4 vzorky a každý z nich byl pořízen e jinou řeznou rychlostí. Posuvové rychlosti v byly nastaveny na 50, 75, 100 a 150  $\text{mm.min}^{-1}$ .

Nejprve se vyhodnocoval průběh akustické emise v čase. Všechny signály akustické emise byly rozděleny na 7 úseků. V prvním úseku se stabilně objevují nejvyšší hodnoty. To je způsobené průstřelem materiálu. V průběhu řezu hodnoty kolísají většinou neperiodicky, ale jsou stabilní. U vzorků D a C se však objevuje náznak periodického kolísání AE u nízkých rychlostí posuvů. Je to patrné zejména na pátém a šestém úseku vzorků. Náznaky periodického kolísání se u vzorků pořízených zaostřovací trubicí o průměru 0,8mm neobjevují. Řezy při rychlosti 150  $\text{mm.min}^{-1}$  se stávají nestabilní. Nestabilita řezu se zvyrazňuje společně s růstem průměru zaostřovací trubice.

Druhým krokem byla analýza FFT spekter akustických emisí. Zde je sledovaný signál transformovaný z amplitudo-časového do amplitudo-frekvenčního-záznamu. zde



mylo možné hledat určitý periodický charakter amplitud na určitých frekvencích. Po této analýze můžeme potvrdit, že hodnoty jsou na prvním úseku výrazně vyšší, než hodnoty z ostatních úseků. Druhé a šesté úseky byly taky velmi rozdílné, i když jsou prakticky stejné. Na šestém úseku se objevují výrazně vyšší hodnoty. To bude způsobeno mechanickým oddělením vzorku. Na všech úsecích se objevovaly maximální hodnoty na těchto frekvencích 2,5kHz, 5,5kHz, 8kHz, 9,5kHz. Ostatní frekvence neprokázaly významnou závislost na měnících se faktorech tohoto experimentu.

Déle byly vyhodnocovány naměřené hodnoty Peak to Peak v závislosti na řezných parametrech. Hodnoty byly porovnány pomocí marginálních grafů. Při průstřelu materiálu hodnoty v závislosti na řezných parametrech kolísají. Na druhém úseku je už patrný nárůst hodnot PtP v společně se zvyšujícím se hmotnostním tokem pro obě dvě zaostřovací trubice. Hodnoty zde rostou také s řeznou rychlostí. Další úseky prokazují, že s vyšším hmotnostním tokem Peak to Peak u hrubší zaostřovací trubice klesají. U zaostřovací trubice s menším průměrem naopak hodnoty akustické emise s hmotnostním tokem rostou. V závislosti akustické emise na hmotnostním toku se objevily dvě výjimky. Na sedmém úseku při rychlosti  $50 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  s hmotnostním tokem u průměru zaostřovací trubice 1,4 mm PtP mírně roste. Odchylka se objevila také u zaostřovací trubice o průměru 0,8 mm. Na pátém úseku při rychlosti  $150 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  při zvyšujícím se hmotnostním toku akustická emise klesá. V závislosti na zvyšující se posuvové rychlosti hodnoty PtP rostou, ale na třetím úseku naopak hodnoty klesly.

Výsledky této práce budou použity v dalších navazujících pracích.

## Seznam použité literatury

- [1] AROLA, D., RUMULU, M. Material removal in abrasive waterjet machining of metals. *Wear* 1997 (210): 50-58.
- [2] AROLA, D., RUMULU, M. Material removal in abrasive waterjet machining of metals a residual stress analysis. *Wear* 1997 (211):302-310.
- [3] AXINTE, D. A., KONG, M. C. An integrated monitoring method to supervise waterjet machining. *CIRP Annals – Manufacturing Technology* 58 (2009): 303-306.
- [4] BEDNÁR, S. Súvislosti medzi hladinou akustického tlaku a faktormi hydroabrazívneho delenia. *Diplomová práca*. Prešov: Technická univerzita v Košiciach, Fakulta výrobných technológií. 2011, 85s
- [5] BENARDOS, P. G., VOSNIAKOS, G.-C. Predicting surface roughness in machining: a review. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 43 (2003): 833-844.
- [6] CHAO, J., GESKIN, E. Experimental study of the striation formation and spectral analysis of the abrasive waterjet generated surfaces. In: *Proceedings of the Seventh American Water Jet Conference*, Seattle, Washington, 1993, pp.27-41.
- [7] DEAM, R. T., LEMMA, E., AHMED, D. H. Modelling of the abrasive water jet cutting. *Wear* 2004 (257): 877-981.
- [8] EL-DOMIATY, A., ABDEL-RAHMAN, A. Fracture mechanics – based model of abrasive waterjet cutting for brittle materials. *J Adv Manufacturing Technologies* 1997 (13): 171-181.
- [9] FAIRHURST, R. M. Diajet – a new abrasive – waterjet cutting technique. *Proceedings of the 8<sup>th</sup> International Symposium on Jet Cutting Technology*. BHRA, Durham, England 1986, s. 395-402
- [10] GOMBÁR, V. Znižovanie zdrojov hlučnosti pri delení vysokorýchlostným hydroabrazívnym prúdom. *Diplomová práca*. Prešov: Technická univerzita v Košiciach, Fakulta výrobných technológií. 2007, 90 s.
- [11] HASSAN, A. I., CHEN, C., KOVACEVIC, R., On-line monitoring of depth of cut in AWJ cutting. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 44 (2004): 595-605.
- [12] HLOCH, S. Hlučnosť a technické možnosti jej znižovania pri delení materiálov vysokorýchlostným hydroabrazívnym prúdom. In: *Bezpečná práca*. roč. 38, č. 3 (2007), s. 3-7. ISSN 0322-8347.

- [13] HLOCH, S., VALÍČEK, J. Vplyv faktorov na topografiu povrchov vytvorených hydroabrazívnym delením. Fakulta výrobných technológií TU v Košiciach so sídlom v Prešove 2008. ISBN 978-80-553-0091-7.
- [14] HLOCH, S., VALÍČEK, J., HREHA, P., BEDNÁR, S., PERŽEL, V., LATOVÁ, A. On-line identifikácia hydroabrazívneho delenia pomocou akustickej emisie a vibrácií. Fakulta výrobných technológií TU v Košiciach so sídlom v Prešove 2011. ISBN 978-80-553-0698-8
- [15] HREHA, P. Štúdium dejov vznikajúcich pri dezintegrácii kovových materiálov hadroabrazívnym delením prostredníctvom vibrácií. *Dizertační práce*. Technická univerzita v Košiciach, Fakulta výrobných technológií. 2012 128s.
- [16] CHEN, F. L., SIORES, E. The effect of cutting je variation on striation formation in abrasive water jet cutting. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 41 (2001): 1479-1486
- [17] CHEN, F. L., WANG, J., LEMMA, E., SIORES, E. The mechanisms of surface striation formation in abrasive waterjet machining. *Journal of Materials Processing Technology* vol. 141 (2003), p. 213-218.
- [18] JURISEVIC, B., BRISSAUD, D., JUNKAR, M. Monitoring of abrasive water jet (AWJ) cutting using sound detection. *Int J Adv Manuf Technol* (2004) 24: 733-737.
- [19] KRAJNÝ, Z., Vodný lúč v praxi. Mračko – Bratislava 1998
- [20] KULECKI, K. M. Processes and apparatus developments in industrial waterjet applications. *Industrial Journal of Machine Tools & Manufacture* 42 (2002) 1297-1306.
- [21] LEBAR, A., JUNKAR, M. Simulation of abrasive water jet cutting process: Part applications. *Industrial Journal of Machine Tools & Manufacture* 42 (2002) 1297-1306.
- [22] LU, C. Study on prediction of surface quality in machining process. *Journal of materials processing technology* 205 (2008): 439-450.
- [23] MAŇKOVÁ, I. Progresívne technológie. Vienaľa Košice 2000, ISBN 80-7099-430-4.
- [24] MARINESCU, I., AXINTE, D. A. A critical analysis of effectiveness of acoustic emission signals to detect tool and workpiece malfunctions in milling operations. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 48 (2008): 1148-1160.
- [25] MOMBER, A. W., MOHAN, R. S., KOVACEVIC, R. On line analysis of hydro-abrasive erosion of pre-cracked materials by acoustic emission. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics* 31 (1999): 1-17.

- [26] TONKSHOFF, H. K., JUNG, M., MANNEL, S., RIETZ, W. Using acoustic emission signals for monitoring of production process. *Ultrasonics* 37 (2000): 681-686.
- [27] TRUCHOT, S., MELLINGER, S., DUCHAMP, R., KIM, J., OSAMPO, R. Development of cryogenic waterjet technique for biometal processing applications. In: 6<sup>th</sup> American Water Jet Conference August 24-27 1991, Huoston, Texas, p. 473-480
- [28] VALÍČEK, J., DRŽÍK, M., HLOCH, S., OHLÍDAL, M., LUPTÁK, L., GOMBÁR, M., RADVANSKÁ, A., HLAVÁČEK, P., PÁLENÍKOVÁ, K. Experimental analysis of irregularities of metallic surfaces generated by abrasive waterjet. *International Journal of Machine & Manufacture* 47 (2007): 1786-1790.
- [29] VIJAY, M. M., BRIELEY, W. H. A study of erosion by high- pressure cavitating and noncavitating waterjets. *Erosion: Prevention and useful applications*. ASTM ATP 664.
- [30] ZHOU, G. Statistical, random and fractal characterizations of surface topography with engineering applications. *Dissertation*. New Jersey: New Jersey Institute of Technology, Department of Mechanical and industrial engineering, 1993, p. 1-43.